平成 26 年度

地層処分技術調査等事業

(岩盤中地下水移行評価確証技術開発)-岩盤中物質移行特性評価技術の確証-

報告書

平成 27 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 割れ目探査技術の開発 1-3
1.4.3 原位置での実証1-4
1.4.4 天然のトレーサーを利用した調査技術の開発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 吸着および移行試験 2-3
2.2.1 岩石試料の準備 2-3
2.2.2 バッチ吸着試験(粉末) 2-5
2.2.3 バッチ吸着試験(ディスク) 2-9
2.2.4 模擬トレーサー試験 2-12
2.2.5 模擬単孔式トレーサー試験 2-16
2.2.6 まとめ 2-19
2.3 蛍光染料の非吸着性トレーサーとしての有用性検討 2-20
2.3.1 蛍光染料の熱に対する耐性試験 2-20
2.3.2 蛍光染料の光に対する耐性試験2-22
2.3.3 岩石や粘土に対する吸着挙動 2-28
2.3.4 ポンプ部材に対する吸着挙動 2-34
2.3.5 蛍光染料の拡散挙動 2-35
2.3.6 まとめ
3. ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発 3-1
3.1 はじめに
3.2 ラドン濃度計測による割れ目幅の推定の概念 3-1
3.3 今年度の実施概要

3	.4 ラド	ンによる割れ目間隙幅の推定手法の堆積岩への適用性検討	3-3
	3.4.1	岩石の物理化学特性	3-3
	3.4.2	堆積岩のラドンフラックスの測定 3	-16
3	.5 原位	置ラドン濃度計測による割れ目の予察的評価3	-21
	3. 5. 1	瑞浪コアによるラドンフラックスの測定3	-21
	3.5.2	原位置におけるラドンフラックス濃度測定と割れ目間隙評価3	-23
3	.6 まと	め	-25
4.	割れ目	の可視化技術の開発	4-1
4	.1 はじ	めに	4-1
4	.2 割れ	目可視化手法の検討	4-1
	4.2.1	概要	4-1
	4.2.2	X 線 CT 法の概要	4-2
	4.2.3	Grinding Tomography 法の概要	4-6
	4.2.4	撮影に用いた岩石コアと撮影条件	4-7
	4.2.5	撮影結果4	-12
	4.2.6	画像解析方法・結果4	-39
	4.2.7	画像解析結果の整理・評価 4	-55
	4.2.8	割れ目間隙の評価フローの提案 4	-59
4	.3 原位	置注入方法の検討	-61
	4.3.1	概要 4	-61
	4.3.2	グリムゼル試験場における既往の研究4	-61
	4.3.3	釜石原位置試験場における既往の研究4	-64
	4.3.4	エスポ地下研究施設における既往の研究4	-68
	4.3.5	レジン特性に関する検討4	-70
	4.3.6	レジン注入装置に関する検討4	-71
	4.3.7	レジン注入方法の検討4	-72
4	.4 レジ	ンの物性試験 4	-74
	4.4.1	可使時間測定試験 4	-74
	4.4.2	粘度測定試験 4	-76
	4.4.3	硬度測定試験 4	-79
	4.4.4	付着強度試験 4	-82
	4.4.5	分離確認試験	-86

	4.5 レジンの浸透解析	4-91
	4.5.1 概要	4-91
	4.5.2 解析条件	4-91
	4.5.3 解析結果	4-97
	4.5.4 解析結果の整理	4-104
	4.6 まとめ	4-104
5.	適用性試験場の地質環境調査	5-1
	5.1 はじめに	5-1
	5.1.1 瑞浪超深地層研究所の研究施設の概要	5-1
	5.1.2 深度 300m ボーリング横坑の概要	5-1
	5.2 適用性試験場の地質環境調査概要	5-3
	5.2.1 調査の目的	5-3
	5.2.2 調査項目	5-4
	5.2.3 調査手順	5-5
	5.3 調査結果	5-46
	5.3.1 13MI37 号孔の調査結果	5-46
	5.3.2 14MI49 号孔の調査結果	5-80
	5.3.3 ボーリング孔跡	5-133
	5.3.4 高解像度 BTV 検層結果	5-138
	5.3.5 ポイント希釈試験結果	5-176
	5.3.6 孔底止水	5-195
	5.3.7 間隙水圧のモニタリング装置の設置	5-201
	5.3.8 間隙水圧モニタリング結果	5-203
	5.4 まとめ	5-210
	5.4.1 地質学的調査(14MI49 号孔)	5-210
	5.4.2 水理学的調査(13MI37 号孔、14MI49 号孔)	5-212
	5.4.3 ポイント希釈試験(13MI37 号孔、14MI49 号孔)	5-214
	5.5 今後の課題	5-215
6.	原位置トレーサー試験	6-1
	6.1 はじめに	6-1
	6.2 トレーサー試験装置概要	6-1
	6.2.1 トレーサー試験装置の構成	

	6.2.2 孔内装置概要	6-3
6	6.3 単孔・孔間トレーサー試験の概要	6-4
	6.3.1 ポイント希釈試験	6-4
	6.3.2 単孔式注水揚水試験	6-7
	6.3.3 ダイポール試験	6-10
6	6.4 トレーサー試験の原位置適用性試験	6-13
	6.4.1 適用性試験場の概要	6-13
	6.4.2 適用性試験での確認項目	6-14
	6.4.3 試験準備	6-16
	6.4.4 原位置試験結果	6-26
	6.4.5 化学分析結果	6-57
	6.4.6 単孔注入揚水試験の評価	6-68
	6.4.7 ダイポール試験の評価	6-98
	6.4.8 試験装置の適用性確認6	-105
	6.4.9 適用性確認で新たに顕在化した問題点とその対策方針6	-109
6	6.5 トレーサー試験結果の評価解析 6	-116
	6.5.1 単孔注水揚水試験の評価解析6	-116
	6.5.2 孔間トレーサー試験の評価解析6	-138
6	6.6 まとめと今後の課題6	-148
	6.6.1 トレーサー試験の原位置適用性試験 6	-149
	6.6.2 トレーサー試験装置の適用性確認6	-150
	6.6.3 適用性確認で新たに顕在化した問題点とその対策6	-150
	6.6.4 トレーサー試験結果の評価解析6	-151
7	7. 天然トレーサーを利用した調査技術の開発	7-1
	7.1 背景	7-1
	7.2 研究項目	7-2
	7.3 研究坑道における地下水調査	7-2
	7.3.1 瑞浪における地下水調査	7-3
	7.3.2 瑞浪における地下水流動・物質移行解析	7-24
	7.3.3 幌延における地下水調査	7-48
	7.3.4 幌延における地下水流動・物質移行解析	7-65

	7.3.5 まとめと今後の課題	7-81
7	7.4 天然トレーサーの調査	7-84
	7.4.1 希ガス採水方法	7-84
	7.4.2 速い流れの指標となる物質	7-92
	7.4.3 遅い流れの指標となる物質7-	-135
	7.4.4 まとめと今後の課題	-145
8. ま	とめと今後の課題	8-1
8.1	1 トレーサー試験に係わる室内試験	8-1
8.2	2 ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発	8-2
8.3	3 割れ目の可視化技術の開発	8-2
8.4	4 適用性試験場の地質環境調査	8-4
8.5	5 原位置トレーサー試験	8-5
8.6	6 天然のトレーサを利用した調査技術の開発	8-6

⊠ 2.2.2-1	粉末状岩石試料への吸着試験における上澄み液中 Rb 濃度の経時変化 2-7
⊠ 2.2.2-2	粉末状岩石試料への吸着試験における上澄み液中 Ba 濃度の経時変化 2-7
⊠ 2.2.2-3	粉末状岩 石試料への吸着試験における Rb 分配係数の経時変化 2-8
⊠ 2.2.2-4	粉末状岩石試料への吸着試験における Ba 分配係数の経時変化 2-8
⊠ 2.2.3-1	ディスク状岩石試料への吸着試験における上澄み溶液中 Rb 濃度経時変化 2-10
⊠ 2.2.3-2	ディスク状岩石試料への吸着試験における上澄み溶液中 Ba 濃度経時変化 2-11
図 2.2.3-3	ディスク状岩石試料への吸着試験結果から算出した Rb 分配係数の経時変化 2-11
図 2.2.3-4	ディスク状岩石試料への吸着試験結果から算出した Ba 分配係数の経時変化 2-12
図 2.2.4-1	模擬トレーサー試験に用いた柱状岩石充填カラム 2-14
⊠ 2.2.4-2	模擬トレーサー試験の試験系 2-14
図 2.2.4-3	模擬トレーサー試験の結果(試験溶液を連続的に添加) 2-15
⊠ 2.2.4-4	模擬トレーサー試験の結果(試験溶液をパルス状に添加) 2-16
図 2.2.5-1	模擬単孔式トレーサー試験の試験系概念図 2-17
⊠ 2.2.5-2	模擬単孔式トレーサー試験の結果 2-18
⊠ 2.3.1-1	試験に用いた4種の蛍光染料の構造式 2-21
⊠ 2.3.2-1	ウラニン蛍光強度の経時変化(室内+屋外試験の結果) 2-23
⊠ 2.3.2-2	ウラニン蛍光強度の経時変化(室内試験の結果) 2-24
⊠ 2.3.2-3	エオシン蛍光強度の経時変化(屋外試験の結果)2-25
⊠ 2.3.2-4	エオシン蛍光強度の経時変化(屋内試験の結果) 2-26
⊠ 2.3.2-5	NAP 蛍光強度の経時変化(屋外試験の結果) 2-26
⊠ 2.3.2-6	NAP 蛍光強度の経時変化(屋内試験の結果) 2-27
⊠ 2.3.2-7	AG 蛍光強度の経時変化(屋外試験の結果)2-27
⊠ 2.3.2-8	AG 蛍光強度の経時変化(屋内試験の結果)2-28
⊠ 2.3.5-1	拡散試験(砂岩、pH6)の低濃度側セルにおけるトレーサー濃度の経時変化 2-37
⊠ 2.3.5-2	拡散試験(砂岩、pH9.5)の低濃度側セルにおけるトレーサー濃度の経時変化 2-37
⊠ 2.3.5-3	拡散試験(砂岩、pH6)の低濃度側セルにおける Cs と NAP 濃度経時変化の比較. 2-38
⊠ 2.3.5-4	拡散試験(砂岩、pH6)の低濃度側セルにおけるトレーサー濃度の経時変化 2-39
⊠ 2.3.5-5	拡散試験(砂岩、pH9.5)の低濃度側セルにおけるトレーサー濃度の経時変化 2-39
図 2.3.5-6	低濃度側セルにおけるウラニン濃度の経時変化 2-40
⊠ 2.3.5-7	泥岩での拡散試験における低濃度側セルのウラニン濃度の経時変化 2-41

図 2.3.5-8 泥岩での拡散試験における低濃度側セルの NAP 濃度の経時変化 2-41

3章 図目次

図 3.2-1 美	ラドンによる割れ目幅計測の原理3-2
⊠ 3.4.1-1	瑞浪花崗岩の Ca0-Na ₂ 0-K ₂ 0 成分の三角ダイアグラム 3-5
⊠ 3.4.1-2	多胡砂岩、藤枝砂岩、幌延泥岩の希土類パターン(ME-MS81の分析値を使用) 3-7
⊠ 3.4.1-3	瑞浪花崗岩の希土類パターン(ME-MS81の分析値を使用)3-8
⊠ 3.4.1-4	X線回折分析フロー図 3-10
⊠ 3.4.2-1	岩石からのラドンフラックスの測定例 3-16
⊠ 3.4.2-2	幌延泥岩ボーリングコアのトリミング方法 3-17
⊠ 3.4.2-3	幌延泥岩の計測フロー 3-18
⊠ 3.4.2-4	多胡砂岩、藤枝砂岩、蛭川花崗岩のラドンフラックス測定結果 3-19
⊠ 3.4.2-5	幌延コアのラドンフラックス測定結果 3-20
⊠ 3.5.1-1	室内試験による時間経過のラドン発生量の関係 3-22
図 3.5.2-1	室内のラドンフラックス測定と原位置ラドン濃度測定から算出した間隙幅 3-24

⊠ 4.2.2-1	マイクロフォーカス X 線 CT スキャナの概略図 4-2
⊠ 4.2.2-2	ビームハードニングアーチファクトの事例 4-3
⊠ 4.2.2-3	端面アーチファクトの事例 4-4
⊠ 4.2.2-4	リング状アーチファクトの事例 4-4
図 4.2.2-5	メタルアーチファクトの事例 4-5
図 4.2.2-6	ミスアライメントアーチファクトの事例 4-6
⊠ 4.2.4-1	撮影に用いた岩石コア 4-8
⊠ 4.2.4-2	切断直後の岩石コア 4-8
図 4.2.4-3	岩石コアの座標系
⊠ 4.2.4-4	撮影領域の設定 4-10
図 4.2.4-5	拡大撮影の位置(高さ) 4-10
図 4.2.4-6	研削面画像取得のための装置 4-12
図 4.2.5-1	異なる表示視野で撮影した医療用 X 線 CT 画像 4-13
⊠ 4.2.5-2	医療用 X 線 CT 画像(xy-断面、12MI30-U) 4-14
⊠ 4.2.5-3	医療用 X 線 CT 画像(xy-断面、12MI30-L) 4-15

⊠ 4.2.5-4	医療用X線CT画像(xy-断面、12MI30-U + 12MI30-L)	4-16
⊠ 4.2.5-5	割れ目の特徴(xy-断面、医療用 X 線 CT 画像)	4-17
⊠ 4.2.5-6	割れ目の閉塞箇所(xy-断面、医療用 X 線 CT 画像)	4-18
図 4.2.5-7	割れ目を横切る黒雲母(xy-断面、医療用 X 線 CT 画像)	4-19
⊠ 4.2.5-8	割れ目に直交な断面(xz-断面、医療用 X 線 CT 画像)	4-20
図 4.2.5-9	割れ目に水平な断面(yz-断面、医療用 X 線 CT 画像)	4-21
図 4.2.5-10	マイクロフォーカス X 線 CT 画像(xy-断面、DFOV:80.896 mm)	4-22
図 4.2.5-11	割れ目の特徴(xy-断面、マイクロフォーカス X 線 CT 画像)	4-23
⊠ 4.2.5-12	割れ目の閉塞箇所(xy-断面、マイクロフォーカス X 線 CT 画像)	4-23
図 4.2.5-13	割れ目に直交な断面(xz-断面、マイクロフォーカス X 線 CT 画像、Case1)	4-24
⊠ 4.2.5-14	割れ目に水平な断面(yz-断面、マイクロフォーカス X 線 CT 画像、Case1)	4-25
図 4.2.5-15	拡大撮影した範囲	4-25
図 4.2.5-16	拡大撮影で得たマイクロフォーカス X 線 CT 画像(Case2)	4-26
図 4.2.5-17	拡大撮影で得たマイクロフォーカス X 線 CT 画像(Case3)	4-27
図 4.2.5-18	割れ目に直交な断面(xz-断面、マイクロフォーカス X 線 CT 画像、Case2)	4-28
図 4.2.5-19	割れ目に水平な断面(yz-断面、マイクロフォーカス X 線 CT 画像、Case2)	4-28
図 4.2.5-20	割れ目に直交な断面(xz-断面、マイクロフォーカス X 線 CT 画像、Case3)	4-28
⊠ 4.2.5-21	割れ目に水平な断面(yz-断面、マイクロフォーカス X 線 CT 画像、Case3)	4-29
⊠ 4.2.5-22	蛍光灯光源下での画像例	4-30
⊠ 4.2.5-23	蛍光灯+紫外線光源下での画像例	4-30
⊠ 4.2.5-24	紫外線光源下での画像例	4-30
⊠ 4.2.5-25	i 詳細観察の位置(12MI30-U)	4-31
⊠ 4.2.5-26	i 詳細観察の位置(12MI30-L)	4-31
⊠ 4.2.5-27	「詳細観察画像1(12MI30-U)	4-33
⊠ 4.2.5-28	詳細観察画像 2(12MI30-U)	4-33
⊠ 4.2.5-29	〕 詳細観察画像 3(12MI30-U)	4-34
⊠ 4.2.5-30	〕 詳細観察画像 4(12MI30-U)	4-34
⊠ 4.2.5-31	詳細観察画像 5(12MI30-L)	4-34
図 4.2.5-32	詳細観察画像 6(12MI30-L)	4-34
図 4.2.5-33	詳細観察画像7(12MI30-L)	4-35
⊠ 4.2.5-34	詳細観察画像 8(12MI30-L)	4-35
図 4.2.5-35	蛍光灯光源下での研削面画像から作成した MPR 画像(12MI30-U)	4-36

図 4.2.5-36	蛍光灯+紫外線光源下での研削面画像から作成した MPR 画像(12MI30-U)	4-36
図 4.2.5-37	紫外線光源下での研削面画像から作成した MPR 画像(12MI30-U)	4-37
図 4.2.5-38	蛍光灯光源下での研削面画像から作成した MPR 画像(12MI30-L)	4-37
⊠ 4.2.5-39	蛍光灯+紫外線光源下での研削面画像から作成した MPR 画像(12MI30-L)	4-38
⊠ 4.2.5-40	紫外線光源下での研削面画像から作成した MPR 画像(12MI30-L)	4-38
⊠ 4.2.6-1	リングアーチファクトの補正手順	4-39
⊠ 4.2.6-2	ビームハードニング補正	4-40
⊠ 4.2.6-3	ビームハードニング補正前後の CT 値分布	4-41
⊠ 4.2.6-4	任意断面における CT 値の頻度分布(医療用 X 線 CT 画像)	4-42
図 4.2.6-5	割れ目面に直交する方向の CT 値の最小値から求めた頻度分布(医療用 X 線 CT 画	ī像)
		4-42
⊠ 4.2.6-6	研削面画像の RGB 分解	4-43
図 4.2.6-7	医療用 X 線 CT 画像から作成した割れ目の 3 次元可視化画像	4-44
⊠ 4.2.6-8	マイクロフォーカスX線CT画像から作成した割れ目の3次元可視化画像(撮影領域	达)
		4-44
図 4.2.6-9	マイクロフォーカスX線CT画像から作成した割れ目の3次元可視化画像(撮影領域	小)
		4-45
······ 図 4. 2. 6-10	研削面画像から作成した割れ目の3次元可視化画像	4-45 4-46
 ⊠ 4. 2. 6-10 ⊠ 4. 2. 6-11	研削面画像から作成した割れ目の3次元可視化画像 医療用X線CT画像から算出した開口幅分布	4-45 4-46 4-47
 ⊠ 4. 2. 6-10 ⊠ 4. 2. 6-11 ⊠ 4. 2. 6-12	研削面画像から作成した割れ目の3次元可視化画像 医療用 X 線 CT 画像から算出した開口幅分布マイクロフォーカス X 線 CT 画像から算出した開口幅分布 (Case1)	4-45 4-46 4-47 4-48
 ☑ 4. 2. 6-10 ☑ 4. 2. 6-11 ☑ 4. 2. 6-12 ☑ 4. 2. 6-13 	研削面画像から作成した割れ目の3次元可視化画像 医療用X線CT画像から算出した開口幅分布マイクロフォーカスX線CT画像から算出した開口幅分布 (Case1)マイクロフォーカスX線CT画像から算出した開口幅分布 (Case2 および Case	4-45 4-46 4-47 4-48 se3)
 ☑ 4. 2. 6-10 ☑ 4. 2. 6-11 ☑ 4. 2. 6-12 ☑ 4. 2. 6-13 	研削面画像から作成した割れ目の3次元可視化画像 医療用X線CT 画像から算出した開口幅分布マイクロフォーカスX線CT 画像から算出した開口幅分布 (Case1)マイクロフォーカス X線 CT 画像から算出した開口幅分布 (Case2 および Cas	4-45 4-46 4-47 4-48 se3) 4-48
 ⊠ 4. 2. 6-10 ⊠ 4. 2. 6-11 ⊠ 4. 2. 6-12 ⊠ 4. 2. 6-13 ⊠ 4. 2. 6-14 	研削面画像から作成した割れ目の3次元可視化画像	4-45 4-46 4-47 4-48 se 3) 4-48 4-49
 ☑ 4. 2. 6-10 ☑ 4. 2. 6-11 ☑ 4. 2. 6-12 ☑ 4. 2. 6-13 ☑ 4. 2. 6-14 ☑ 4. 2. 6-15 	研削面画像から作成した割れ目の3次元可視化画像	4-45 4-46 4-47 4-48 se3) 4-48 4-49 4-50
 ⊠ 4. 2. 6-10 ⊠ 4. 2. 6-11 ⊠ 4. 2. 6-12 ⊠ 4. 2. 6-13 ⊠ 4. 2. 6-14 ⊠ 4. 2. 6-15 ⊠ 4. 2. 6-16 	研削面画像から作成した割れ目の3次元可視化画像	4-45 4-46 4-47 4-48 3e3) 4-48 4-49 4-50 4-50
 ⊠ 4. 2. 6-10 ⊠ 4. 2. 6-11 ⊠ 4. 2. 6-12 ⊠ 4. 2. 6-13 ⊠ 4. 2. 6-14 ⊠ 4. 2. 6-15 ⊠ 4. 2. 6-16 ⊠ 4. 2. 6-17 	研削面画像から作成した割れ目の3次元可視化画像	4-45 4-46 4-47 4-48 3e3) 4-48 4-49 4-50 4-50 4-51
 ⊠ 4. 2. 6-10 ⊠ 4. 2. 6-11 ⊠ 4. 2. 6-12 ⊠ 4. 2. 6-13 ⊠ 4. 2. 6-14 ⊠ 4. 2. 6-15 ⊠ 4. 2. 6-16 ⊠ 4. 2. 6-17 ⊠ 4. 2. 6-18 	研削面画像から作成した割れ目の3次元可視化画像	4-45 4-46 4-47 4-48 3e3) 4-48 4-49 4-50 4-50 4-51 4-51
 ⊠ 4. 2. 6-10 ⊠ 4. 2. 6-11 ⊠ 4. 2. 6-12 ⊠ 4. 2. 6-13 ⊠ 4. 2. 6-14 ⊠ 4. 2. 6-15 ⊠ 4. 2. 6-16 ⊠ 4. 2. 6-17 ⊠ 4. 2. 6-18 ⊠ 4. 2. 6-19 	研削面画像から作成した割れ目の3次元可視化画像	4-45 4-46 4-47 4-48 3e3) 4-48 4-49 4-50 4-50 4-51 4-51 4-52
 ⊠ 4. 2. 6-10 ⊠ 4. 2. 6-11 ⊠ 4. 2. 6-12 ⊠ 4. 2. 6-13 ⊠ 4. 2. 6-14 ⊠ 4. 2. 6-15 ⊠ 4. 2. 6-16 ⊠ 4. 2. 6-17 ⊠ 4. 2. 6-18 ⊠ 4. 2. 6-19 ⊠ 4. 2. 6-20 	研削面画像から作成した割れ目の3次元可視化画像	4-45 4-46 4-47 4-48 3e3) 4-48 4-49 4-50 4-50 4-51 4-51 4-52 4-53
 ⊠ 4. 2. 6-10 ⊠ 4. 2. 6-11 ⊠ 4. 2. 6-12 ⊠ 4. 2. 6-13 ⊠ 4. 2. 6-14 ⊠ 4. 2. 6-15 ⊠ 4. 2. 6-16 ⊠ 4. 2. 6-17 ⊠ 4. 2. 6-18 ⊠ 4. 2. 6-19 ⊠ 4. 2. 6-20 ⊠ 4. 2. 6-21 	研削面画像から作成した割れ目の3次元可視化画像	4-45 4-46 4-47 4-48 3e3) 4-48 4-49 4-50 4-50 4-51 4-51 4-52 4-53 4-54
 ⊠ 4. 2. 6-10 ⊠ 4. 2. 6-11 ⊠ 4. 2. 6-12 ⊠ 4. 2. 6-13 ⊠ 4. 2. 6-14 ⊠ 4. 2. 6-15 ⊠ 4. 2. 6-16 ⊠ 4. 2. 6-17 ⊠ 4. 2. 6-18 ⊠ 4. 2. 6-19 ⊠ 4. 2. 6-20 ⊠ 4. 2. 6-21 ⊠ 4. 2. 6-22 	研削面画像から作成した割れ目の3次元可視化画像	4-45 4-46 4-47 4-48 3e3) 4-48 4-49 4-50 4-50 4-51 4-51 4-52 4-53 4-54 4-54

⊠ 4.2.7-1	医療用 X 線 CT 画像とマイクロフォーカス X 線 CT 画像の比較 4	-56
⊠ 4.2.7-2	3次元可視化画像の比較4	-57
図 4.2.7-3	研削面画像と医療用 X 線 CT 画像の比較 4	-57
図 4.2.7-4	研削面画像とマイクロフォーカス X 線 CT 画像の比較 4	-58
⊠ 4.2.8-1	割れ目間隙の評価フロー 4	-60
⊠ 4.3.5-1	Injection-26 とエバーボンド EP-400M との比較 4	-71
⊠ 4.3.6-1	開発するレジン注入試験装置の概念図 4	-72
⊠ 4.4.1-1	可使時間測定試験の実施状況 4	-74
⊠ 4.4.1-2	SS#1 の可使時間測定結果 4	-75
⊠ 4.4.1-3	EP-400Mの可使時間測定結果 4	-75
図 4.4.1-4	可使時間測定結果(蛍光剤なし) 4	-75
図 4.4.2-1	粘度測定試験の実施状況4	-77
⊠ 4.4.2-2	SS#1の粘度測定結果	-78
⊠ 4.4.2-3	EP-400Mの粘度測定結果4	-78
⊠ 4.4.3-1	硬度測定試験の供試体 4	-79
⊠ 4.4.3-2	硬度測定試験の実施状況4	-80
⊠ 4.4.3-3	SS#1の硬度試験結果	-81
⊠ 4.4.3-4	EP-400Mの硬度試験結果4	-81
⊠ 4.4.4-1	付着強度試験の供試体4	-82
図 4.4.4-2	付着強度試験の実施状況14	-83
⊠ 4.4.4-3	付着強度試験の実施状況 2 4	-84
⊠ 4.4.4-4	付着強度試験による破壊面の状況 4	-85
図 4.4.5-1	分離確認試験の供試体(IPA 有) 4	-86
⊠ 4.4.5-2	分離確認試験の実施状況14	-87
図 4.4.5-3	分離確認試験の実施状況 3 4	-88
図 4.4.5-4	IPA の有無による蛍光輝度の差 4	-89
図 4.4.5-5	IPA の有無による蛍光輝度の差 4	-90
図 4.5.2-1	解析領域4	-91
図 4.5.2-2	解析メッシュ(全体図) 4	-92
⊠ 4.5.2-3	解析メッシュ(注入孔付近拡大図) 4	-92
図 4.5.2-4	レジンの流入時刻を表す変数 S	-93
⊠ 4.5.2-5	Hele Shaw 流れ	-94

図 4.5.2-6 基準の割れ目厚と見かけ流速 4-9
図 4.5.2-7 実流速と実割れ目厚 4-9
図 4.5.3-1 一様な割れ目へのレジンの浸潤の例(開口幅 0.01 mm、注入圧力 1 MPa、9019 秒後)
図 4.5.3-2 レジンの浸潤半径の経時変化(割れ目開口幅 0.1~1.0 mm、注入圧力 0.5 MPa) 4-9
図 4.5.3-3 レジンの浸潤半径の経時変化(割れ目開口幅 0.1~1.0 mm、注入圧力 1.0 MPa) 4-9
図 4.5.3-4 レジンの浸潤半径の経時変化(割れ目開口幅 0.01~0.1 mm、注入圧力 0.5 MPa) 4-9
図 4.5.3-5 レジンの浸潤半径の経時変化(割れ目開口幅 0.01~0.1 mm、注入圧力 1.0 MPa) 4-9
図 4.5.3-6 確率的に発生させた割れ目の透水量係数分布の例(パターン A) 4-10
図 4.5.3-7 不均質な割れ目への樹脂の浸透結果の例(パターン A) 4-10
図 4.5.3-8 レジンの浸潤半径の経時変化 (パターン A の 10 リアライゼーション、注入圧 1MPa)
図 4.5.3-9 レジンの浸潤半径の経時変化 (パターン B の 10 リアライゼーション、注入圧 1MPa)
図 4.5.3-10 注入孔から 20cm までの透水量係数対数平均と平均浸潤半径(パターン A、注入圧 1MPa
図 4.5.3-11 注入孔から 20cm までの透水量係数対数平均と平均浸潤半径(パターン B、注入圧 1MPa

図 5.1.1-1	岐阜県瑞浪市における瑞浪超深地層研究所の位置と地下研究施設	5-2
⊠ 5.1.2-1	深度 300m ボーリング横坑構造図	5-2
⊠ 5.2.1-1	深度 300m ボーリング横坑における調査エリア	5-3
⊠ 5.2.2-1	実施フロー	5-4
⊠ 5.2.3-1	ボーリングマシン	5-5
⊠ 5.2.3-2	4インチ孔ロケーシング	5-5
⊠ 5.2.3-3	ボーリングロッド	5-5
⊠ 5.2.3-4	ボーリングビット	5-5
⊠ 5.2.3-5	シート養生状況	5-7
⊠ 5.2.3-6	掘削水量の計測状況	5-7
⊠ 5.2.3-7	掘削水用タンク	5-7
図 5.2.3-8	排水側の電磁流量計	5-7

⊠ 5.2.3-9	深度 300m ボーリング横坑作業区域概念図 5-8
図 5.2.3-10	ボーリング資機材配置および掘削水の給排水ルート概要図 5-8
図 5.2.3-11	孔口ケーシング仕上げ概念図5-9
⊠ 5.2.3-12	1 段目の作業手順 5-10
図 5.2.3-13	φ86mm(1段目)掘削状況5-11
⊠ 5.2.3-14	孔口ケーシング挿入状況5-11
⊠ 5.2.3-15	マニホールド設置状況5-11
図 5.2.3-16	加圧試験状況
図 5.2.3-17	センターリーマー
⊠ 5.2.3-18	孔口装置概要図5-11
図 5.2.3-19	分光蛍光光度計(F-2500 Fluorescence Spectrophotometer)と蛍光染料濃度計測状
況	
⊠ 5.2.3-20	孔曲り検層状況(14MI49 号孔)5-13
図 5.2.3-21	村田製作所社製シングルショット SR 測定器 5-13
図 5.2.3-22	コアへの基準線記入例 5-14
図 5.2.3-23	コアへの基準線記入状況5-15
図 5.2.3-24	コア箱への収納状況5-15
図 5.2.3-25	条線およびステップの計測の一例 5-16
図 5.2.3-26	コア写真撮影台5-18
図 5.2.3-27	コア写真状況の一例5-18
⊠ 5.2.3-28	キャリパー検層ツール 5-19
⊠ 5.2.3-29	キャリパー検層状況5-20
図 5.2.3-30	キャリパー検層装置のアーム5-20
図 5.2.3-31	スポンジパッカーの機能 5-21
図 5.2.3-32	BTV・フローメータ検層装置の概要図 5-21
図 5.2.3-33	測定プローブ(BTV・フローメータ)の挿入状況 5-22
⊠ 5.2.3-34	BTV・フローメータ検層状況5-22
図 5.2.3-35	BTV 孔壁画像取得状況5-22
⊠ 5.2.3-36	透水試験装置の設置概念図 5-24
図 5.2.3-37	透水試験の基本作業フロー5-26
⊠ 5.2.3-38	透水試験状況 5-28
図 5.2.3-39	定量試験用モーノポンプ 5-28

⊠ 5.2.3-40	間隙水圧測定時の概念	5-28
図 5.2.3-41	定圧試験の概念	5-28
⊠ 5.2.3-42	定流量揚水試験の概念	5-29
⊠ 5.2.3-43	パルス試験の概念	5-29
図 5.2.3-44	Log(t)-s曲線(左)、Derivative Plot(右)の例	5-31
図 5.2.3-45	Log(tp・Δt/(tp+Δt))-Sr 曲線(上) 、Derivative Plot(下)の例	5-32
図 5.2.3-46	Hvorslevのt-Log s曲線	5-33
図 5.2.3-47	Cooper らの曲線一致法	5-34
⊠ 5.2.3-48	間隙水圧モニタリング装置	5-34
図 5.2.3-49	間隙水圧モニタリング装置	5-34
図 5.2.3-50	間隙水圧モニタリング装置の設置例	5-35
図 5.2.3-51	ポイント希釈試験の試験手順	5-37
⊠ 5.2.3-52	村田式デジタルオンラインシステム(写真は動作確認時のもの)	5-38
図 5.2.3-53	掘削方向に誤差が生じた場合の方位角のズレについて	5-39
⊠ 5.2.3-54	BIP-V システム構成	5-40
図 5.2.3-55	面構造の走向傾斜の解析ルーチン	5-41
図 5.2.3-56	幅の計測結果	5-43
図 5.2.3-57	止水パッカー	5-44
図 5.2.3-58	止水パッカー設置の概念図	5-45
図 5.3.1-1	13MI37 号孔キャリパー検層結果	5-46
⊠ 5.3.1-2	13MI37 号孔のフローメータ検層結果	5-48
図 5.3.1-3	13MI37 号孔 22~24mabh 付近の単孔式透水試験深度図	5-49
図 5.3.1-4	13MI37 号孔 20~22mabh 付近の単孔式透水試験深度図	5-49
図 5.3.1-5	13MI37 号孔 19~21mabh 付近の単孔式透水試験深度図	5-49
図 5.3.1-6	13MI37 号孔 18~20mabh 付近の単孔式透水試験深度図	5-49
図 5.3.1-7	13MI37 号孔 17~19mabh 付近の単孔式透水試験深度図	5-50
図 5.3.1-8	13MI37 号孔 No.1 区間の試験時における圧力変化	5-51
図 5.3.1-9	13MI37 号孔 No.1 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot	5-52
図 5.3.1-10	13MI37 号孔 No.1 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果	5-52
図 5.3.1-11	13MI37 号孔 No.1 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot	5-53
図 5.3.1-12	13MI37 号孔 No.1 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果.	5-53
図 5.3.1-13	13MI37 号孔 No.1 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図	5-54

図 5.3.1-14	13MI37 号孔 No.1 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図	5-54
図 5.3.1-15	13MI37 号孔 No.1 区間定流量揚水試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図	5-55
図 5.3.1-16	13MI37 号孔 No.2 区間の試験時の圧力変化	5-56
図 5.3.1-17	13MI37 号孔 No.2 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot	5-56
図 5.3.1-18	13MI37 号孔 No.2 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果	5-57
図 5.3.1-19	13MI37 号孔 No.2 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot	5-57
図 5.3.1-20	13MI37 号孔 No.2 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果.	5-58
図 5.3.1-21	13MI37 号孔 No.2 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図	5-58
⊠ 5.3.1-22	13MI37 号孔 No.2 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図	5-59
⊠ 5.3.1-23	13MI37 号孔 No.2 区間定流量揚水試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図	5-59
図 5.3.1-24	13MI37 号孔 No.3 区間の試験時における圧力変化	5-60
図 5.3.1-25	13MI37 号孔 No.3 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot	5-61
図 5.3.1-26	13MI37 号孔 No.3 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果	5-61
図 5.3.1-27	13MI37 号孔 No.3 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot	5-62
図 5.3.1-28	13MI37 号孔 No.3 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果.	5-62
図 5.3.1-29	13MI37 号孔 No.3 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図	5-63
図 5.3.1-30	13MI37 号孔 No.3 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図	5-63
図 5.3.1-31	13MI37 号孔 No.3 区間定流量揚水試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図	5-64
⊠ 5.3.1-32	13MI37 号孔 No. 4 区間試験時における圧力変化	5-65
図 5.3.1-33	13MI37 号孔 No.4 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot	5-65
図 5.3.1-34	13MI37 号孔 No.4 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果	5-66
図 5.3.1-35	13MI37 号孔 No.4 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot	5-66
図 5.3.1-36	14MI49 号孔 No.4 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果.	5-67
図 5.3.1-37	13MI37 号孔 No. 4 区間定流量試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図	5-67
図 5.3.1-38	13MI37 号孔 No. 4 区間定流量試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図	5-68
図 5.3.1-39	13MI37 号孔 No. 4 区間定流量試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図	5-68
図 5.3.1-40	13MI37 号孔 No.5 区間試験時における圧力変化	5-69
図 5.3.1-41	13MI37 号孔 No.5 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot	5-70
⊠ 5.3.1-42	13MI37 号孔 No.5 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果	5-70
図 5.3.1-43	13MI37 号孔 No.5 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot	5-71
図 5.3.1-44	13MI37 号孔 No.5 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果.	5-71
図 5.3.1-45	13MI37 号孔 No.5 区間定流量試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図	5-72

図 5.3.1-46	13MI37 号孔 No.5 区間定流量試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図	5-72
図 5.3.1-47	13MI37 号孔 No. 5 区間定流量試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図	5-73
図 5.3.1-48	13MI37 号孔 No.6 区間試験時における圧力変化	5-74
図 5.3.1-49	13MI37 号孔 No.6 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot	5-74
図 5.3.1-50	13MI37 号孔 No.6 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果	5-75
図 5.3.1-51	13MI37 号孔 No.6 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot	5-75
図 5.3.1-52	13MI37 号孔 No.6 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果.	5-76
図 5.3.1-53	13MI37 号孔 No. 6 区間定流量試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図	5-76
図 5.3.1-54	13MI37 号孔 No.6 区間定流量試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図	5-77
図 5.3.1-55	13MI37 号孔 No. 6 区間定流量試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図	5-77
図 5.3.1-56	孔間透水試験結果一覧図	5-78
図 5.3.2-1	14MI49 号孔の掘削方向平面図	5-80
図 5.3.2-2	14MI49 号孔ロケーシング設置概念図	5-81
図 5.3.2-3	14MI49 号孔掘削時孔口湧水量測定結果	5-82
図 5.3.2-4	14MI49 号孔湧水区間のコア写真	5-83
⊠ 5.3.2-5	14MI49 号孔掘削時のモニタリング装置の配置	5-84
⊠ 5.3.2-6	14MI49 号孔掘削中の 12MI30 号孔の水圧挙動	5-85
⊠ 5.3.2-7	14MI49 号孔掘削中の 12MI31 号孔への水圧挙動	5-85
⊠ 5.3.2-8	14MI49 号孔掘削中の 13MI36 号孔の水圧挙動	5-86
⊠ 5.3.2-9	14MI49 号孔掘削中の 13MI37 号孔への水圧挙動	5-86
⊠ 5.3.2-10	14MI49 号孔掘削水のアミノG酸濃度と湧水量	5-87
⊠ 5.3.2-11	14MI49 号孔総合柱状図	5-89
⊠ 5.3.2-12	コア写真 14MI49 号孔(0~9mabh)	5-90
⊠ 5.3.2-13	コア写真 14MI49 号孔(9~18mabh)	5-91
⊠ 5.3.2-14	コア写真 14MI49 号孔(18~22.47mabh)	5-92
⊠ 5.3.2-15	14MI49 号孔 緑泥石脈と緑泥石の付着する割れ目	5-93
⊠ 5.3.2-16	14MI49 号孔 緑泥石脈と緑泥石の付着する割れ目	5-94
⊠ 5.3.2-17	14MI49 号孔 割れ目に少量認められる黄鉄鉱 (22.37mabh)	5-94
⊠ 5.3.2-18	14MI49 号孔 断層角礫岩(深度 7.55~8.11mabh)	5-95
⊠ 5.3.2-19	14MI49 号孔 断層角礫岩(13.91~13.99mabh 間)	5-96
⊠ 5.3.2-20	14MI49 号孔キャリパー検層結果	5-98
図 5.3.2-21	14MI49 号孔のフローメータ検層結果	5-99

⊠ 5.3.2-22	14MI49 号孔 18~22mabh 付近の単孔式透水試験深度図	5-100
⊠ 5.3.2-23	14MI49 号孔 16mabh 付近の単孔式透水試験深度図	5-100
⊠ 5.3.2-24	14MI49 号孔 15.5mabh 付近の単孔式透水試験深度図	5-101
⊠ 5.3.2-25	14MI49 号孔 15.0mabh 付近の単孔式透水試験深度図	5-101
⊠ 5.3.2-26	14MI49 号孔 14.5mabh 付近の単孔式透水試験深度図	5-101
⊠ 5.3.2-27	14MI49 号孔 No.1 区間の試験時における圧力変化	5-103
⊠ 5.3.2-28	14MI49 号孔 No.1 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot	5-103
⊠ 5.3.2-29	14MI49 号孔 No.1 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果	5-104
図 5.3.2-30	14MI49 号孔 No.1 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot	5-104
図 5.3.2-31	14MI49 号孔 No.1 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果	5-105
⊠ 5.3.2-32	14MI49 号孔 No.1 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図	5-105
⊠ 5.3.2-33	14MI49 号孔 No.1 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図	5-106
⊠ 5.3.2-34	14MI49 号孔 No.1 区間定流量揚水試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図	5-106
⊠ 5.3.2-35	14MI49 号孔 No.1 区間定流量揚水試験時の 13MI37 号孔の水圧応答結果図	5-107
⊠ 5.3.2-36	14MI49 号孔 No.2 区間の試験時の圧力変化	5-108
図 5.3.2-37	14MI49 号孔 No.2 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot	5-108
図 5.3.2-38	14MI49 号孔 No.2 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果	5-109
図 5.3.2-39	14MI49 号孔 No.3 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot	5-109
⊠ 5.3.2-40	14MI49 号孔 No.2 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果	5-110
図 5.3.2-41	14MI49 号孔 No.2 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図	5-110
⊠ 5.3.2-42	14MI49 号孔 No.2 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図	5-111
⊠ 5.3.2-43	14MI49 号孔 No.2 区間定流量揚水試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図	5-111
図 5.3.2-44	14MI49 号孔 No.2 区間定流量揚水試験時の 13MI37 号孔の水圧応答結果図	5-112
⊠ 5.3.2-45	14MI49 号孔 No.3 区間の試験時における圧力変化	5-113
図 5.3.2-46	14MI49 号孔 No.3 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot	5-113
図 5.3.2-47	14MI49 号孔 No.3 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果	5-114
⊠ 5.3.2-48	14MI49 号孔 No.3 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot	5-114
図 5.3.2-49	14MI49 号孔 No.3 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果	5-115
図 5.3.2-50	14MI49 号孔 No.3 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図	5-115
図 5.3.2-51	14MI49 号孔 No.3 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図	5-116
⊠ 5.3.2-52	14MI49 号孔 No.3 区間定流量揚水試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図	5-116
⊠ 5.3.2-53	14MI49 号孔 No.3 区間定流量揚水試験時の 13MI37 号孔の水圧応答結果図	5-117

⊠ 5.3.2-54	14MI49 号孔 No.4 区間の試験時における圧力変化	5-118
図 5.3.2-55	14MI49 号孔 No.4 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot	5-118
図 5.3.2-56	14MI49 号孔 No.4 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果	5-119
図 5.3.2-57	14MI49 号孔 No.4 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot	5-119
図 5.3.2-58	14MI49 号孔 No.4 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果	5-120
図 5.3.2-59	14MI49 号孔 No.4 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図	5-120
図 5.3.2-60	14MI49 号孔 No.4 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図	5-121
図 5.3.2-61	14MI49 号孔 No.4 区間定流量揚水試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図	5-121
図 5.3.2-62	14MI49 号孔 No.4 区間定流量揚水試験時の 13MI37 号孔の水圧応答結果図	5-122
図 5.3.2-63	14MI49 号孔 No.5 区間の試験時における圧力変化	5-123
図 5.3.2-64	14MI49 号孔 No.5 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot	5-123
図 5.3.2-65	14MI49 号孔 No.5 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果	5-124
図 5.3.2-66	14MI49 号孔 No.5 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot	5-124
図 5.3.2-67	14MI49 号孔 No.5 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果	5-125
図 5.3.2-68	14MI49 号孔 No.5 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図	5-125
図 5.3.2-69	14MI49 号孔 No.5 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図	5-126
図 5.3.2-70	14MI49 号孔 No.5 区間定流量揚水試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図	5-126
図 5.3.2-71	14MI49 号孔 No.5 区間定流量揚水試験時の 13MI37 号孔の水圧応答結果図	5-127
図 5.3.2-72	14MI49 号孔 No.6 区間の試験時における圧力変化	5-128
図 5.3.2-73	14MI49 号孔 No.6 区間非定常試験の Hvorslev 法による解析結果	5-128
図 5.3.2-74	14MI49 号孔 No.6 区間非定常試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図	5-129
図 5.3.2-75	14MI49 号孔 No.6 区間非定常試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図	5-129
図 5.3.2-76	14MI49 号孔 No.6 区間非定常試験時の 12MI36 号孔の水圧応答結果図	5-130
図 5.3.2-77	14MI49 号孔 No.6 区間非定常試験時の 12MI37 号孔の水圧応答結果図	5-130
図 5.3.2-78	孔間透水試験結果一覧図	5-131
図 5.3.3-1	デジタルオンラインシステムによる高精度孔曲がり検層計測状況	5-133
図 5.3.3-2	13MI37 号孔のボーリング孔跡図(左右変位推移)	5-133
図 5.3.3-3	13MI37 号孔のボーリング孔跡図(上下変位推移)	5-134
図 5.3.3-4	14MI49 号孔のボーリング孔跡図(左右変位推移)	5-134
図 5.3.3-5	14MI49 号孔のボーリング孔跡図(上下変位推移)	5-135
図 5.3.3-6	測量結果(方位角)	5-136
図 5.3.4-1	13MI37 号孔 孔壁展開図 0.00~4.00mabh (撮影は 2.46mabh から)	5-139

⊠ 5.3.4-2	13MI37 号孔	孔壁展開図	4.00~8.00mabh	5-140
図 5.3.4-3	13MI37 号孔	孔壁展開図	8.00~12.00mabh	5-141
図 5.3.4-4	13MI37 号孔	孔壁展開図	12.00~16.00mabh	5-142
図 5.3.4-5	13MI37 号孔	孔壁展開図	16.00~20.00mabh	5-143
図 5.3.4-6	13MI37 号孔	孔壁展開図	20.00~24.00mabh	5-144
図 5.3.4-7	13MI37 号孔	孔壁展開図	24.00~26.00mabh (撮影は 25.26mabh まで)	5-145
⊠ 5.3.4-8	14MI49 号孔	孔壁展開図	4.00~8.00mabh (撮影は 4.45mabh から)	5-146
⊠ 5.3.4-9	14MI49 号孔	孔壁展開図	8.00~12.00mabh	5-147
⊠ 5.3.4-11	14MI49 号孔	孔壁展開図	12.00~16.00mabh	5-148
⊠ 5.3.4-12	14MI49 号孔	孔壁展開図	16.00~20.00mabh	5-149
図 5.3.4-13	14MI49 号孔	孔壁展開図	20.00~23.00mabh (撮影は 22.32mabh まで)	5-150
⊠ 5.3.4-14	13MI37 号孔	ステレオネ	ット図 - 全不連続面	5-152
図 5.3.4-15	13MI37 号孔	ステレオネ	ット図 - 割れ目	5-153
図 5.3.4-16	13MI37 号孔	ステレオネ	ット図 - 開口割れ目	5-154
図 5.3.4-17	14MI49 号孔	ステレオネ	ット図 - 全不連続面	5-155
⊠ 5.3.4-18	14MI49 号孔	ステレオネ	ット図 - 割れ目	5-156
図 5.3.4-19	14MI49 号孔	ステレオネ	ット図 - 開口割れ目	5-157
図 5.3.4-20	13MI37 号孔	岩盤分離面の	の間隔、深度-方位分布および深度-傾斜分布	5-159
⊠ 5.3.4-21	14MI49 号孔	岩盤分離面の	の間隔、深度-方位分布および深度-傾斜分布	5-160
⊠ 5.3.4-22	13MI37 号孔	詳細観察画	象(19.14mabh、N65W/89N)	5-162
⊠ 5.3.4-23	13MI37 号孔	詳細観察画	象(20.35mabh、N13W/17E)	5-163
⊠ 5.3.4-24	13MI37 号孔	詳細観察画	象(20.74mabh、N20W/79E)	5-164
図 5.3.4-25	13MI37 号孔	詳細観察画	象(20.81mabh、N36W/85NE)	5-165
⊠ 5.3.4-26	13MI37 号孔	詳細観察画	象(21.01mabh、N25W/82E)	5-166
図 5.3.4-27	13MI37 号孔	詳細観察画	象(21.28mabh、N34W/89NE)	5-167
⊠ 5.3.4-28	13MI37 号孔	詳細観察画	象(23.12mabh、N26W/80E)	5-168
図 5.3.4-29	14MI49 号孔	詳細観察画	象(14.55mabh、N70W/12N)	5-169
図 5.3.4-30	14MI49 号孔	詳細観察画	象(14.91mabh、N24W/84E)	5-170
⊠ 5.3.4-31	14MI49 号孔	詳細観察画	象(14.98mabh、N19W/86E)	5-171
⊠ 5.3.4-32	14MI49 号孔	詳細観察画	象(15.55mabh、N32W/88SW)	5-172
⊠ 5.3.4-33	14MI49 号孔	詳細観察画	象(16.15mabh、N5W/5E)	5-173
⊠ 5.3.4-34	14MI49 号孔	詳細観察画	象(16.45mabh、N66W/8N)	5-174

⊠ 5.3.4-35	14MI49 号孔 詳細観察画像(22.37mabh 付近)	5-175
図 5.3.5-1	ポイント希釈試験実施概念図	5-177
図 5.3.5-2	ポイント希釈試験状況	5-177
図 5.3.5-3	13MI37 号孔試験実施位置と間隙水圧モニタリング装置の配置	5-177
図 5.3.5-4	14MI49 号孔試験実施位置と間隙水圧モニタリング装置の配置	5-178
図 5.3.5-5	ウラニン濃度の検量線(13MI37 号孔)	5-178
図 5.3.5-6	ウラニン濃度の検量線(14MI49 号孔)	5-179
図 5.3.5-7	ポイント希釈試験結果 D7M3(13MI37 号孔 Int2)	5-180
図 5.3.5-8	ポイント希釈試験結果 D7M4(13MI37 号孔 Int3)	5-181
図 5.3.5-9	ポイント希釈試験結果 D7M5(13MI37 号孔 Int4)	5-182
図 5.3.5-10	ポイント希釈試験結果 D7M6(13MI37 号孔 Int5)	5-183
図 5.3.5-11	ポイント希釈試験結果 D9M7(14MI49 号孔 Int2)	5-184
図 5.3.5-12	ポイント希釈試験結果 D9M7(14MI49 号孔 Int3)	5-185
図 5.3.5-13	ポイント希釈試験結果 D9M7(14MI49 号孔 Int4)	5-186
図 5.3.5-14	D7M3 トレーサー濃度の経時変化 (Ln(C/C ₀))	5-188
図 5.3.5-15	D7M4 トレーサー濃度の経時変化 (Ln(C/C ₀))	5-189
図 5.3.5-16	D7M5 トレーサー濃度の経時変化 (Ln(C/C ₀))	5-189
⊠ 5.3.5-17	D7M6 トレーサー濃度の経時変化 (Ln(C/C ₀))	5-190
⊠ 5.3.5-18	D7M7 トレーサー濃度の経時変化 (Ln(C/C ₀))	5-191
⊠ 5.3.5-19	14MI49 号孔 Int2 における試験中の間隙水圧変動とトレーサー濃度	5-191
図 5.3.5-20	D9M8 トレーサー濃度の経時変化 (Ln(C/C ₀))	5-192
⊠ 5.3.5-21	D9M9 トレーサー濃度の経時変化 (Ln(C/C ₀))	5-192
⊠ 5.3.6-1	12MI30 号孔ケーシングログ	5-195
図 5.3.6-2	12MI30 号孔止水パッカー圧の推移	5-196
図 5.3.6-3	13MI36 号孔ケーシングログ	5-197
図 5.3.6-4	13MI36 号孔止水パッカー圧の推移	5-198
図 5.3.6-5	13MI37 号孔ケーシングログ	5-199
図 5.3.6-6	13MI37 号孔止水パッカー圧の推移	5-200
図 5.3.7-1	設置前の間隙水圧モニタリング装置孔内部	5-201
図 5.3.7-2	間隙水圧モニタリング装置の設置状況	5-201
図 5.3.7-3	12MI30 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図	5-201
図 5.3.7-4	12MI31 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図	5-201

🗵 5.3.7-5	13MI36 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図	5-202
図 5.3.7-6	13MI37 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図	5-202
図 5.3.7-7	14MI49 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図	5-202
図 5.3.7-8	間隙水圧モニタリング装置の設置状況	5-203
図 5.3.8-1	間隙水圧モニタリング結果(全孔)	5-204
図 5.3.8-2	間隙水圧モニタリング結果(12MI30 号孔)	5-205
図 5.3.8-3	間隙水圧モニタリング結果(12MI31 号孔)	5-206
図 5.3.8-4	間隙水圧モニタリング結果(13MI36 号孔)	5-207
図 5.3.8-5	間隙水圧モニタリング結果(13MI37 号孔)	5-208
図 5.3.8-6	間隙水圧モニタリング結果(14MI49 号孔)	5-209
図 5.4.1-1	14MI49 号孔の総合土質柱状図	5-211

図 6.2.1-1	トレーサー試験装置構成図6-2
⊠ 6.2.2-1	左図:通常型のパッカー部、右図:改良型のパッカー部
図 6.3.1-1	ポイント希釈試験の試験手順概念図 6-6
⊠ 6.3.2-1	単孔式トレーサー試験における試験孔のトレーサー濃度変化の模式説明図 6-7
⊠ 6.3.2-2	単孔式注水揚水試験の試験手順概念図 6-9
図 6.3.3-1	ダイポール試験の概念図6-10
⊠ 6.3.3-2	ダイポール試験の試験手順6-12
図 6.4.1-1	試験対象となる試験孔(12MI30、12MI31)の配置図 6-13
⊠ 6.4.1-2	孔内試験装置配置図6-13
図 6.4.2-1	試験区間形成メッシュ部6-14
⊠ 6.4.2-2	ピストンパッカー 上:形状写真 下:構造図 6-15
図 6.4.2-3	トレーサー注入切換え用六方バルブ設計図 6-15
図 6.4.3-1	蛍光センサー (Ver.3.0) 6-16
⊠ 6.4.3-2	高出力タイプ LED 光源 6-16
図 6.4.3-3	分光器6-17
図 6.4.3-4	作業風景
図 6.4.3-5	作業風景 2
図 6.4.3-6	各蛍光センサーの設置位置6-19
図 6.4.3-7	検量線1:蛍光センサーVer.16-21

図 6.4.3-8	検量線2:蛍光センサーVer.26-21
図 6.4.3-9	検量線3:蛍光センサーVer.36-22
図 6.4.3-10	検量線 4: 蛍光センサーVer. 3 6-22
図 6.4.3-11	装置の設置手順
⊠ 6.4.3-12	トレーサー試験装置の挿入状況6-24
図 6.4.3-13	治具使用状況6-24
⊠ 6.4.3-14	パッカー拡張用タンク6-28
図 6.4.4-1	12MI30 のポイント希釈試験結果 6-27
⊠ 6.4.4-2	12MI31 のポイント希釈試験結果6-28
図 6.4.4-3	DOM1 試験時の濃度経時変化 6-30
図 6.4.4-4	D1T2 試験時の濃度経時変化 6-31
図 6.4.4-5	単孔式注水揚水試験 SOM1 結果 6-35
図 6.4.4-6	単孔式注水揚水試験(SOM2)結果6-36
図 6.4.4-7	単孔式注水揚水試験 SOM3 結果 6-37
図 6.4.4-8	単孔式注水揚水試験 S1T4 結果 6-38
図 6.4.4-9	単孔式注水揚水試験 S1T5 結果 6-39
図 6.4.4-10	単孔式注水揚水試験 S1T6 結果 6-40
図 6.4.4-11	単孔式注水揚水試験 S1T7 結果 6-41
図 6.4.4-12	単孔式注水揚水試験 SOT8 結果 6-42
図 6.4.4-13	単孔式注水揚水試験 SOT9 結果 6-43
図 6.4.4-14	単孔式注水揚水試験 SOT10 結果 6-44
図 6.4.4-15	ダイポール試験 W1T1 結果 6-47
図 6.4.4-16	ダイポール試験 W1T2 結果 6-48
図 6.4.4-17	ダイポール試験 W1T3 結果 6-49
図 6.4.4-18	ダイポール試験 W1T4 結果 6-50
図 6.4.4-19	ダイポール試験 W1T5 結果 6-51
図 6.4.4-20	ダイポール試験 W1T6 結果 6-52
図 6.4.4-21	ダイポール試験 WOT7 結果 6-53
⊠ 6.4.4-22	ダイポール試験 WOT8 結果 6-54
⊠ 6.4.4-23	ダイポール試験 WOT9 結果 6-55
⊠ 6.4.4-24	ダイポール試験 W1T10 結果 6-56
図 6.4.5-1	SOM2 破過曲線 6-62

⊠ 6.4.5-2	SOM3 破過曲線	6-62
図 6.4.5-3	S0T9 破過曲線	6-63
図 6.4.5-4	S0T10 破過曲線	6-63
図 6.4.5-5	S1T4 破過曲線	6-64
図 6.4.5-6	S1T5 破過曲線	6-64
図 6.4.5-7	S1T6 破過曲線	6-65
図 6.4.5-8	S1T7 破過曲線	6-65
図 6.4.5-9	W1T5 破過曲線	6-67
図 6.4.5-10	WOT9 破過曲線	6-67
図 6.4.6-1	回収率と注入量と揚水量の体積比の関係	6-70
図 6.4.6-2	Rb と Ba の回収率の関係	6-71
図 6.4.6-3	遅延係数の感度解析結果の一例	6-71
図 6.4.6-4	保存性トレーサーの破過曲線比較	6-73
図 6.4.6-5	破過曲線から計算される回収率の経時変化(保存性トレーサー)	6-73
図 6.4.6-6	吸着性トレーサー (Rb⁺) の破過曲線比較	6-74
図 6.4.6-7	破過曲線から計算される回収率の経時変化(Rb ⁺ トレーサー)	6-74
図 6.4.6-8	吸着性トレーサー (Ba ²⁺) の破過曲線比較	6-75
図 6.4.6-9	破過曲線から計算される回収率の経時変化(Ba ²⁺ トレーサー)	6-75
図 6.4.6-10	待機時間中のトレーサーのボーリング孔への流入	6-76
図 6.4.6-11	補正概念図	6-78
図 6.4.6-12	チューブ分散の計算概念図	6-79
図 6.4.6-13	重ね合わせ計算例	6-80
図 6.4.6-14	SOM2 蛍光センサー破過曲線補正結果	6-83
図 6.4.6-15	SOM3 蛍光センサー破過曲線補正結果	6-83
図 6.4.6-16	S0T9 蛍光センサー破過曲線補正結果	6-83
⊠ 6.4.6-17	S0T10 蛍光センサー破過曲線補正結果	6-83
⊠ 6.4.6-18	S1T4 蛍光センサー破過曲線補正結果	6-84
図 6.4.6-19	S1T 蛍光センサー破過曲線補正結果	6-84
図 6.4.6-20	S1T6 蛍光センサー破過曲線補正結果	6-84
図 6.4.6-21	S1T7 蛍光センサー破過曲線補正結果	6-84
⊠ 6.4.6-22	SOM3 チューブ分散計算結果	6-85
図 6.4.6-23	S0T9 チューブ分散計算結果	6-85

⊠ 6.4.6-24	S1T4 チューブ分散計算結果	. 6-85
図 6.4.6-25	S1T5 チューブ分散計算結果	. 6-85
図 6.4.6-26	SOM3 チューブ分散長の評価結果	. 6-86
図 6.4.6-27	S0T9 チューブ分散長の評価結果	. 6-86
図 6.4.6-28	S1T4 チューブ分散長の評価結果	. 6-87
図 6.4.6-29	S1T5 チューブ分散長の評価結果	. 6-87
図 6.4.6-30	ー様流中の揚水範囲の経時変化計算例	. 6-89
図 6.4.6-31	図解法による回収率計算例	. 6-90
図 6.4.6-32	SOM1 図解法による回収率評価結果	. 6-92
図 6.4.6-33	SOM2 図解法による回収率評価結果	. 6-92
図 6.4.6-34	SOM3 図解法による回収率評価結果	. 6-93
図 6.4.6-35	S0T8 図解法による回収率評価結果	. 6-93
図 6.4.6-36	S0T9 図解法による回収率評価結果	. 6-94
図 6.4.6-37	S0T10 図解法による回収率評価結果	. 6-94
図 6.4.6-38	S1T4 図解法による回収率評価結果	. 6-95
図 6.4.6-39	S1T5 図解法による回収率評価結果	. 6-95
図 6.4.6-40	S1T6 図解法による回収率評価結果	. 6-96
図 6.4.6-41	S1T7 図解法による回収率評価結果	. 6-96
図 6.4.7-1	30mg/Lのトレーサー溶液を用いてダイポール比を変えた事前試験結果	6-100
図 6.4.7-2	W1T3 と W1T4 の注入量の差が与える影響試験結果	6-101
図 6.4.7-3	W1T5 と W1T6 の注入量の差が与える影響試験結果	6-102
図 6.4.7-4	揚水量とトレーサー濃度が与える影響試験結果	6-103
図 6.4.7-5	同一試験条件における再現性試験結果	6-104
図 6.4.8-1	5MPa 対応高精度圧力計の出力	6-105
図 6.4.8-2	試験区間形状の違いによるトレーサー置換時の濃度変化	6-106
図 6.4.8-3	六方バルブ使用時のトレーサー注入効果	6-107
図 6.4.8-4	旧光源と新光源を用いた蛍光強度の関係	6-108
図 6.4.9-1	ウラニンとアミノG酸をカクテルした10000mg/Lの原液	6-109
図 6.4.9-2	蛇腹チューブに光ファイバ類まとめる作業	6-110
図 6.4.9-3	ロッド内に収納する配管類の概念図	6-110
図 6.4.9-4	ロッド内の蛇腹チューブとパッカー拡張用チューブ	6-111
図 6.4.9-5	ロッド構造図	6-111

図 6.4.9-6	間隙水圧モニタリング装置のロッドの概念図	6-111
図 6.4.9-7	Ver.2(12MI30 号孔)と Ver.3(12MI31 号孔)における光ファイバの接続点	6-112
図 6.4.9-8	接続箇所を4カ所にした光ファイバの概念図	6-112
図 6.4.9-9	場の影響試験結果	6-113
図 6.4.9-10	マノメーターによる水位差の測定概要	6-114
図 6.4.9-11	マノメーターによる水位差の測定結果	6-114
図 6.5.1-1	解析モデル	6-117
図 6.5.1-2	SOM3 保存性トレーサーの評価結果(誤差)	6-123
図 6.5.1-3	SOM3 保存性トレーサーの評価結果(回収率)	6-124
図 6.5.1-4	SOM3 保存性トレーサーの破過曲線(縦分散長 0.5m)	6-125
図 6.5.1-5	SOM3 吸着性トレーサーの評価結果(誤差)	6-126
図 6.5.1-6	SOM3 吸着性トレーサーの評価結果(回収率)	6-126
図 6.5.1-7	SOM3 吸着性トレーサー (Rb ⁺) の破過曲線	6-126
図 6.5.1-8	SOM3 吸着性トレーサー (Ba ²⁺) の破過曲線	6-126
図 6.5.1-9	S1T5 保存性トレーサーの評価結果(誤差)	6-127
図 6.5.1-10	S1T5 保存性トレーサーの評価結果(回収率)	6-128
図 6.5.1-11	S1T5 保存性トレーサーの破過曲線(縦分散長 0.5m)	6-129
図 6.5.1-12	S1T5 吸着性トレーサーの評価結果(誤差)	6-130
図 6.5.1-13	S1T5 吸着性トレーサーの評価結果(回収率)	6-130
図 6.5.1-14	S1T5 吸着性トレーサー(Rb⁺)の破過曲線	6-130
図 6.5.1-15	S1T5 吸着性トレーサー(Ba ²⁺)の破過曲線	6-130
図 6.5.1-16	S1T6 保存性トレーサーの評価結果(誤差)	6-131
図 6.5.1-17	S1T6 保存性トレーサーの評価結果(回収率)	6-132
図 6.5.1-18	S1T6 保存性トレーサーの破過曲線(縦分散長 0.5m)	6-133
図 6.5.1-19	S1T6 吸着性トレーサーの評価結果(誤差)	6-134
図 6.5.1-20	S1T6 吸着性トレーサーの評価結果(回収率)	6-134
図 6.5.1-21	S1T6 吸着性トレーサー(Rb⁺)の破過曲線	6-134
⊠ 6.5.1-22	S1T6 吸着性トレーサー(Ba ²⁺)の破過曲線	6-134
図 6.5.1-23	図解法による回収率評価結果(割れ目幅 0.2mm)	6-136
図 6.5.2-1	解析モデル(保存性トレーサーを用いた孔間試験)	6-140
図 6.5.2-2	バックグラウンドの地下水流れの方向と回収率(W1T5 試験)	6-141
⊠ 6.5.2-3	バックグラウンドの地下水流れの方向と回収率(WOT9 試験)	6-141

図 6.5.2-4	バックグラウンドの地下水流量と回収率(W1T5 試験)	6-142
図 6.5.2-5	バックグラウンドの地下水流量と回収率(WOT9 試験)	6-142
図 6.5.2-6	推定されたバックグラウンドの地下水流れの下での回収率(W1T5 試験)	6-143
図 6.5.2-7	推定されたバックグラウンドの地下水流れの下での回収率(WOT9 試験)	6-143
図 6.5.2-8	3 次元解析メッシュ	6-146
図 6.5.2-9	トレーサーによる岩石基質メッシュ厚さの違い	6-146
図 6.5.2-10	3 次元モデルによる重水の破過曲線のフィッティング(W1T5 試験)	6-147
図 6.5.2-11	3 次元モデルによる Rb⁺の破過曲線のフィッティング(W1T5 試験)	6-147
図 6.5.2-12	3 次元モデルによる Ba ²⁺ の破過曲線のフィッティング(W1T5 試験)	6-147

図 7.3.1-1	採水地点位置図(日本原子力研究開発機構(2014)に加筆)7-3
⊠ 7.3.1-2	13MI37 孔の区間編成 7-4
図 7.3.1-3	希ガス採取システムの概念図と銅管 7-5
図 7.3.1-4	希ガス採取状況
図 7.3.1-5	ボトルへの採水状況
図 7.3.1-6	ヘキサダイアグラムの時間変化 7-16
図 7.3.1-7	浅層水の指標の時間変化
図 7.3.1-8	深層水の指標の時間変化
図 7.3.1-9	浅層水の指標の相互比較 7-19
図 7.3.1-10	⁴ He と ³ He/ ⁴ He の関係 7-20
図 7.3.1-11	C1と ³⁶ C1/C1の関係
図 7.3.1-12	HCO₃濃度と ¹⁴ C 濃度の関係 7-22
図 7.3.1-13	水素同位体比と酸素同位体比の関係 7-22
⊠ 7.3.1-14	浅層地下水流入の概念図 7-23
図 7.3.2-1	立坑への湧水量の経時変化 7-25
⊠ 7.3.2-2	主立坑・換気立坑、坑道などへの湧水量 7-25
図 7.3.2-3	研究所周辺での水圧低下の経時変化 7-26
図 7.3.2-4	立坑周辺での地下水湧出と水圧低下の概念図 7-27
図 7.3.2-5	立坑湧水の Cl 濃度の経時変化(尾上ほか、2014) 7-28
図 7.3.2-6	解析に用いた FEM 解析メッシュ 7-29
図 7.3.2-7	解析モデルで考慮した断層

図 7.3.2-8	解析の境界条件図	7-31
図 7.3.2-9	水圧低下量鉛直断面図, 立坑付近拡大(立坑境界条件感度解析)	7-33
図 7.3.2-10	全水頭のボーリング孔鉛直分布図(立坑境界条件感度解析)	7-33
図 7.3.2-11	水圧低下量(定常,各地層の透水係数感度解析)	7-34
⊠ 7.3.2-12	ボーリング孔位置での全水頭(定常,各地層・断層の透水係数感度解析)	7-35
図 7.3.2-13	立坑周辺での浅層水の流入(定常, 各地層の透水係数感度解析)	7-36
⊠ 7.3.2-14	立坑での浅層水進入率(定常, 各地層・断層の透水係数感度解析)	7-37
図 7.3.2-15	深層水の流入(定常,各地層の透水係数感度解析)	7-38
図 7.3.2-16	立坑位置での Cl ⁻ 濃度(定常,各地層・断層の透水係数感度解析)	7-39
図 7.3.2-17	断層の扱いによる水圧低下、浅層水、深層水流入の変化	7-40
図 7.3.2-18	ボーリング孔位置の全水頭(定常、断層の有無についての感度解析)	7-41
図 7.3.2-19	立坑位置のトレーサー濃度(定常,断層の有無についての感度解析)	7-41
図 7.3.2-20	瑞浪層群の異方性の変化による水圧低下、浅層水、深層水流入の変化	7-42
図 7.3.2-21	瑞浪層群の異方性の変化によるボーリング孔位置の全水頭の変化	7-43
図 7.3.2-22	瑞浪層群の異方性の変化による立坑位置のトレーサー濃度の変化	7-43
図 7.3.2-23	鉛直断面図 立坑付近拡大(非定常計算)	7-44
図 7.3.2-24	ボーリング孔ごとの全水頭履歴(非定常計算)	7-45
図 7.3.2-25	WR での Cl⁻濃度計算結果・観測値・湧水量観測値	7-46
図 7.3.3-1	幌延深地層研究センターにおける採水地点	7-48
図 7.3.3-2	原位置での希ガス採水方法の概念図	7-49
図 7.3.3-3	³⁶ C1/C1 の時間変化と年代の関係	7-55
図 7.3.3-4	放射化解析への各元素の寄与率	7-58
⊠ 7.3.3-5	水素・酸素同位体比の関係	7-60
図 7.3.3-6	³⁶ C1/C1 と酸素同位体比の関係	7-60
図 7.3.3-7	⁴ He と ³ He/ ⁴ He の関係	7-64
⊠ 7.3.4-1	立坑掘削の進捗(日本原子力研究開発機構、2011)	7-65
図 7.3.4-2	湧水量の時間変化(稲垣、2014)	7-66
⊠ 7.3.4-3	立坑周辺のボーリング孔における水圧低下	7-67
図 7.3.4-4	立坑周辺での地下水湧出と水圧低下の概念図	7-68
⊠ 7.3.4-5	解析に用いた FEM 解析メッシュ	7-69
⊠ 7.3.4-6	涵養量の感度解析結果	7-71
図 7.3.4-7	境界条件の感度解析結果	7-72

図 7.3.4-8	立坑掘削時の境界条件の概念図	7-73
図 7.3.4-9	立坑掘削状態の境界条件による感度解析	7-74
図 7.3.4-10	F1 断層の有無による感度解析	7-75
図 7.3.4-11	透水係数の感度解析(水圧低下)	7-76
⊠ 7.3.4-12	透水係数の感度解析(地下水の流入率)	7-77
図 7.3.4-13	立坑・調査坑掘削過程の流量の時系列変化	7-79
⊠ 7.3.4-14	立坑周辺のボーリング孔での水位変化	7-79
⊠ 7.3.4-15	立坑周辺での水圧低下	7-80
⊠ 7.3.4-16	立坑周辺での地表水の流入	7-80
図 7.4.1-1	原位置平衡式サンプラーの概念図(Seldom et al., 2003)	7-85
⊠ 7.4.1-2	試作した原位置平衡式サンプラー	7-86
図 7.4.1-3	原位置平衡式サンプラーによる室内試験写真	7-86
図 7.4.1-4	サンプラー内の圧力変化	7-88
図 7.4.1-5	He ガスの漏気試験	7-88
図 7.4.1-6	圧力制御式での採取状況	7-91
図 7.4.1-7	循環式での採取状況	7-91
図 7.4.2-1	トリチウム測定用試料の多段階濃縮のフロー	7-93
図 7.4.2-2	エオシン濃度と見かけ上トリチウム濃度の関係	7-98
⊠ 7.4.2-3	ナフチオン濃度と見かけ上トリチウム濃度の関係	7-98
図 7.4.2-4	アミノG酸濃度と見かけ上トリチウム濃度の関係	7-99
図 7.4.2-5	陰イオン交換樹脂と接触後の溶液中アミノG酸濃度の経時変化 7	7-102
図 7.4.2-6	陰イオン交換樹脂と接触後の溶液中ナフチオン酸ナトリウム濃度の経時変化7	7-102
図 7.4.2-7	日光に曝露した溶液中の蛍光染料濃度の経時変化 7	7-103
図 7.4.2-8	二酸化炭素回収試験装置の概念図(左)と実際の写真(右) 7	7-106
図 7.4.2-9	二酸化炭素トラップからアルカリトラップへの回収時の試験系 7	7-108
図 7.4.2-10	瑞浪地域の地下水における He 年代と有機 ¹⁴ ℃ 年代の関係(富岡ら 2007 に加]筆)
•••••		7-116
図 7.4.2-11	サイズ排除クロマトグラフィにおける流出液中の TOC 濃度と EC の関係 7	7-118
図 7.4.2-12	膜モジュールを組み込んだ透析試験の試験系 7	7-118
図 7.4.2-13	透析試験における液量と TOC 濃度および回収率の関係 7	7-120
⊠ 7.4.2-14	透析における溶液の pH と回収率の関係 7	7-120
図 7.4.2-15	中規模透析試験に利用した試験系の概念図 7	7-122

xxvii

図 7.4.2-16	処理前後の 1H-NMR 分析の結果	7-124
図 7.4.2-17	種々の処理前後のサイズ排除クロマトグラフィ測定結果	7-125
図 7.4.2-18	各フラクションにおける Sr の回収率	7-129
図 7.4.2-19	Sr 樹脂における硝酸濃度とイオン選択性の関係	7-132
図 7.4.3-1	Through-diffusion 試験の概念図	7-137
図 7.4.3-2	濃度変化を考慮した分別係数の評価方法	7-137
図 7.4.3-3	岩石間隙を水で飽和させる試験手順の概念図	7-138
図 7.4.3-4	HCD-3 孔(幌延)のコアによる拡散試験結果	7-141
図 7.4.3-5	Marree(GAB) のコアによる拡散試験結果	7-142
図 7.4.3-6	Richmond(GAB) のコアによる拡散試験結果	7-143
図 7.4.3-7	土岐花崗岩(GAB)のコアによる拡散試験結果	7-144
図 7.4.3-8	拡散試験における濃度経時変化の pH 依存性	7-145

表 目 次

1章 表目次

_ 孜 1. 5. 2 1 _ 切 九工性	表 1.3.2-1	研究工程	1-	3
-----------------------	-----------	------	----	---

2章 表目次

表 2.2.2-1	吸着試験に用いた模擬地下水調製用試薬の一覧 2-5
表 2.2.2-2	調製した模擬地下水の組成 2-6
表 2.2.6-1	取得した分配係数のまとめ 2-19
表 2.3.2-1	光曝露から7日経過後の蛍光強度、総有機炭素濃度のまとめ 2-28
表 2.3.3-1	模擬海水を 1L 調製するために用いた試薬とその量 2-30
表 2.3.3-2	模擬海水における主要イオン濃度 2-30
表 2.3.3-3	ウラニンの岩石への吸着試験結果 2-31
表 2.3.3-4	アミノ G (AG) を用いた吸着試験の結果 2-31

3章 表目次

表 3.4.1-1	分析試料一覧3
表 3.4.1-2	蛍光 X 線による試験岩石の主要元素 3-4
表 3.4.1-3	微量元素分析 (ME-MS61) 3-0
表 3.4.1-4	微量元素分析 (ME-MS81) 3-7
表 3.4.1-5	X線回折分析試料一覧 3-9
表 3.4.1-6	X線回折分析試料 3-1
表 3.4.1-7	ラジウム分析試料一覧 3-1
表 3.4.1-8	間隙率測定試料一覧と測定結果 3-12
表 3.4.1-9	細孔分布測定試料一覧 3-1:
表 3.4.1-10	細孔分布測定結果 3-14
表 3.4.1-11	測定試料一覧と測定結果 3-1
表 3.4.2-1	方形岩石試料の寸法と試料数 3-1
表 3.4.2-2	トリミングした幌延泥岩コア数と試験試料数 3-18
表 3.5.1-1	ラドン発生試験に用いた瑞浪ボーリングコア 3-22
表 3.5.1-2	瑞浪コアのラドンフラックスの測定結果 3-22
表 3.5.2-1	各モニタリング区間のラドン濃度測定結果 3-2:

表 4.2.4-1	マイクロフォーカス X 線 CT での撮影条件 4-10
表 4.2.4-2	撮影条件 4-12
表 4.2.6-1	割れ目開口幅の統計(研削画像) 4-55
表 4.3.2-1	Injection-26 の仕様 4-63
表 4.3.2-2	AU126 へのレジンの注入量 4-63
表 4.3.3-1	釜石原位置試験の調査項目 4-66
表 4.3.3-2	単一割れ目の地下水流動試験で用いたレジンの特性 4-67
表 4.3.4-1	EPO-TEK 301 の特性 4-69
表 4.3.5-1	各サイトで使用したレジン 4-70
表 4.3.6-1	各サイトで使用したポンプの特徴 4-72
表 4.3.7-1	レジンに添加した蛍光剤とクロスチェックの工夫 4-73
表 4.4.1-1	可使時間の評価結果 4-76
表 4.4.4-1	付着強度測定結果 4-85
表 4.5.3-1	透水量係数場の発生に使用した統計量 4-100

5章 表目次

表 5.2.3-1	主要ボーリング機材一覧表 5-6
表 5.2.3-2	分光蛍光光度計(F-2500 Fluorescence Spectrophotometer)の仕様と機能 5-12
表 5.2.3-3	キャリパー検層装置の性能一覧表 5-19
表 5.2.3-4	BTV カメラの性能一覧表 5-21
表 5.2.3-5	フローメータ検層装置の性能一覧表 5-21
表 5.2.3-6	透水試験使用機器一覧表5-24
表 5.2.3-7	モーノポンプの仕様 5-26
表 5.2.3-8	間隙水圧モニタリング装置の仕様一覧 5-35
表 5.2.3-9	止水作業に用いた資機材一覧 5-44
表 5.3.1-1	13MI37 号孔のフローメータ検層結果一覧 5-47
表 5.3.1-2	13MI37 号孔単孔式透水試験の結果 5-50
表 5.3.1-3	13MI37 号孔 孔間透水試験結果一覧表5-78
表 5.3.1-4	12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔への圧力応答結果一覧表 5-79
表 5.3.2-1	14MI49 号孔の仕様 5-80
表 5.3.2-2	14MI49 号孔掘削時孔口湧水量測定結果 5-82

表 5.3.2-3	14MI49 号孔孔曲り検層結果	. 5-97
表 5.3.2-4	14MI49 号孔のフローメータ検層結果一覧	. 5-99
表 5.3.2-5	14MI49 号孔単孔式透水試験の結果	5-102
表 5.3.2-6	14MI49 号孔 孔間透水試験結果一覧表	5-131
表 5.3.2-7	12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔、13MI37 号孔への圧力応答結果一覧表	5-132
表 5.3.3-1	測量結果	5-135
表 5.3.3-2	測量結果と高精度孔曲り検層結果との差	5-136
表 5.3.3-3	本報告書で用いたボーリング掘削方向	5-137
表 5.3.4-1	各孔の全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目計測結果	5-138
表 5.3.4-2	各孔の全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目の主な卓越方向	5-151
表 5.3.4-3	各孔の全岩盤分離面の集中箇所とその主な方向	5-158
表 5.3.4-4	割れ目開口幅の計測結果一覧	5-161
表 5.3.5-1	ポイント希釈試験実施概要(13MI37 号孔)	5-176
表 5.3.5-2	ポイント希釈試験実施概要(14MI49 号孔)	5-176
表 5.3.5-3	トレーサー濃度測定装置の仕様	5-179
表 5.3.5-4	各試験区間の区間容量	5-187
表 5.3.5-5	地下水流量の算出結果一覧	5-193
表 5.3.5-6	動水勾配の算出結果一覧	5-194
表 5.3.6-1	12MI30 号孔の止水パッカー設置深度	5-195
表 5.3.6-2	12MI30 号孔の孔口湧水量測定結果	5-196
表 5.3.6-3	13MI36 号孔の止水パッカー設置深度	5-197
表 5.3.6-4	13MI36 号孔の孔口湧水量測定結果	5-198
表 5.3.6-5	13MI37 号孔の止水パッカー設置深度	5-199
表 5.3.6-6	13MI37 号孔の孔口湧水量測定結果	5-200
表 5.3.8-1	水圧安定時の間隙水圧モニタリング結果(平成 26 年 1 月 31 日)	5-203
表 5.4.1-1	深度別に見た割れ目密度とその成因	5-211
表 5.4.2-1	13MI37 号孔孔間透水試験結果一覧表	5-213
表 5.4.2-2	14MI49 号孔孔間透水試験結果一覧表	5-214

6章 表目次

表 6.4.2-1	Mensor 社製 CPT6000 の主な仕様	6-14
表 6.4.3-1	蛍光センサーの主な仕様	6-17

表 6.4.3-2	各種トレーサー試験と蛍光濃度センサーおよび Integral Timeの対応表6-	20
表 6.4.4-1	試験名の読み方6-	26
表 6.4.4-2	ポイント希釈試験実施ケース6-	26
表 6.4.4-3	ポイント希釈試験結果と水理ファクター 6-3	32
表 6.4.4-4	単孔式注水揚水試験実施ケース(試験孔 12MI30)6-3	33
表 6.4.4-5	単孔式注水揚水試験実施ケース(試験孔 12MI31)6-3	34
表 6.4.4-6	12MI30を揚水孔としたダイポール試験実施ケース①6-4	45
表 6.4.4-7	12MI31を揚水孔としたダイポール試験実施ケース6-4	46
表 6.4.5-1	分析項目と分析方法 6-4	57
表 6.4.5-2	12MI30D1 における回収率6-	59
表 6.4.5-3	12MI31D1 における回収率6-0	60
表 6.4.5-4	フラクションコレクターの設定6-0	61
表 6.4.6-1	透水量係数算定結果6-0	68
表 6.4.6-2	12MI30D1 におけるトレーサーとチェーサーの体積比6-	72
表 6.4.6-3	12MI31D1 におけるトレーサーとチェーサーの体積比6-	72
表 6.4.6-4	各試験条件におけるデッドボリューム6-8	81
表 6.4.6-5	補正係数の計算結果6-8	81
表 6.4.6-6	回収率計算条件(12MI30D1)6-9	91
表 6.4.6-7	回収率計算条件(12MI31D1)6-9	91
表 6.4.6-8	図解法による回収率評価結果まとめ6-9	97
表 6.4.7-1	ダイポール試験トレーサー回収率6-9	98
表 6.4.7-2	W1T1、W1T2、W0T7 試験条件 6-10	00
表 6.4.7-3	W1T3、W1T4 試験条件 6-10	01
表 6.4.7-4	W1T5、W1T6 試験条件 6-10	02
表 6.4.7-5	W1T6、W0T8、W1T10 試験条件 6-10	02
表 6.4.7-6	WOT8、WOT9 試験条件 6-10	03
表 6.4.8-1	Mensor 社製 CPT6000 の主な仕様 6-10	05
表 6.4.8-2	D101、D1T2 試験条件 6-10	06
表 6.4.8-3	W304、W1T5 試験条件 6-10	07
表 6.4.8-4	光源の仕様比較6-10	08
表 6.4.9-1	SOM3、SOT8 試験時の 12MI31 号孔の区間編成 6-1	13
表 6.5.1-1	SOM3 解析条件 6-1	19

表 6.5.1-2	S1T4、S1T5 解析条件 6-	-119
表 6.5.1-3	評価解析による結果まとめ6-	-135

7章 表目次

表 7.3.1-1	採水項目と採取目的および取得量7-7
表 7.3.1-2	原位置計測結果
表 7.3.1-3	瑞浪超深地層研究所における地下水の分析結果 7-13
表 7.3.2-1	瑞浪地域サイトスケールの物性と断層幅 7-32
表 7.3.3-1	地下水の分析結果
表 7.3.3-2	岩石の分析結果と ³⁶ C1/C1 平衡値の計算値 7-57
表 7.3.3-3	³⁶ C1 年代の計算結果
表 7.3.4-1	解析に用いた物性値 7-70
表 7.4.1-1	希ガスの分析結果
表 7.4.2-1	多段階濃縮における濃縮率とトリチウム検出下限の関係 7-94
表 7.4.2-2	蛍光染料の種類とトリチウムの見かけ上濃度の関係 7-97
表 7.4.2-3	樹脂の種類と樹脂と接触後のエオシン濃度の関係 7-100
表 7.4.2-4	地下水サンプルにおける沈殿法と追い出し法で取得した ¹⁴ Cの比較結果 7-105
表 7.4.2-5	模擬サンプル(NaHCO3 溶液)における沈殿法と追い出し法で取得した ¹⁴ ℃の比較結果
•••••	
表 7.4.2-6	沈殿法と追い出し法で取得した ¹⁴ Cの比較結果(¹⁴ C濃度を高めたサンプル) 7-112
表 7.4.2-7	沈殿法と追い出し法で取得した ¹⁴ Cの比較結果(C濃度 5mg/L) 7-113
表 7.4.2-8	沈殿法と追い出し法で取得した ¹⁴ Cの比較結果(模擬海水ベース) 7-114
表 7.4.2-9	海水ベースの地下水から回収した有機物の精製過程におけるイオン・TOC 濃度.7-123
表 7.4.2-10	炭酸ストロンチウム沈殿を利用した Sr 回収試験の回収率 7-130
表 7.4.2-11	Sr 樹脂処理前後のイオン濃度比較 7-132
表 7.4.3-1	拡散試験条件と拡散試験結果

平成27年3月31日発行

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。

昨年度から開始したフェーズでは、研究期間を平成 25 年度から平成 29 年度の 5 ヵ年とし、1.3.1

- 1-2 -
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。

事業項目	平成25年度	平成26年	₣度	平成2	7年度	平成28年度	平成29年度
トレーサ試験技術の高度化	単孔式・孔間トレーサ試験技術						
		ラドン濃度計測試験技術					
割れ目探査技術の高度化		高粘性流体注入試驗		黄技術			
		割れ目	目可視化	技術			
		試験場の地	質環境詞	周査			
	単孔式・孔間トレーサ			試験			
			室内	収着·拡散	試験		
国内の地下環境への適用	トレーサ試験予測解析			トレーサ試験評価解析		評価解析	
					ラドン濃度言	十測試験	
						高粘性流体注入試	÷
						樹朋	註入試験
	#	采水方法の検討	ł				
天然トレーサを利用した調査 技術の開発				幌延・瑞浪での採水		水	
	評価指標の	調査					
				評価方	法の検討		評価方法の提案
物質移行評価手法の体系化							

表 1.3.2-1 研究工程

※ 装置・手法の改良は原位置試験とインタラクティブに実施

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

原位置トレーサー試験の試験条件の設定及び解析に必要なデータを取得するため、室内の吸着及び 拡散試験を実施する。また、核種移行の主要なパラメータである分配係数については、試料形状の違 いなどによる影響を同様に室内試験により把握する。

1.4.2 割れ目探査技術の開発

国内の種々の岩石を用いて室内ラドン溶解試験を継続し、岩石からのラドンフラックスを把握する とともに、ラドン濃度計測による割れ目調査が可能な岩種を把握する。

また、原位置でのレジン注入法や注入装置の仕様を固めるため、岩石コア等を用いたレジン注入試 験などにより、レジンの物理特性と割れ目の浸透特性との関係について検討するとともに、既往研究 などの情報を整理する。

- 1.4.3 原位置での実証
 - 適用性試験場の地質環境調査

昨年度に続き、適用性試験場において、原位置トレーサー試験のためのボーリング孔を掘削し、 地質環境調査(コア観察、BTV検層、フローメータ検層、間隙水圧計測、透水試験等)を実施し、 トレーサー試験結果の解析評価に資する試験場の詳細な地質環境特性を明らかにする。

(2) 予備試験

昨年度に改良したトレーサー試験装置を用い、適用性試験場のボーリング孔において、ポイント 希釈試験を実施し、試験場周辺岩盤の自然状態(注水・揚水を行わない状態)での地下水流量を計 測する。

(3) 原位置トレーサー試験

昨年度に改良したトレーサー試験装置を用いて、複数のトレーサーを強制的に岩盤に注入した後 に回収する単孔式トレーサー試験を実施する。この試験結果に基づき、数値シミュレーションによ り、ボーリング孔周辺の水みちの分散長、遅延係数などの物質移行特性を評価する。

また、その結果に基づき孔間トレーサー試験を実施し、試験結果の数値シミュレーションにより、 ボーリング孔間の水みちの開口幅(あるいは間隙率)と分散長などの物質移行特性を評価する。

(4) ラドン濃度計測予備試験

ボーリング孔から採水し、ラドン濃度を計測して、ボーリング孔周辺岩盤内の水みちの開口幅に ついて予備的評価を実施する。

- 1.4.4 天然のトレーサーを利用した調査技術の開発
 - (1) 地下の適用性試験場における地下水調査

昨年度に続き、瑞浪超深地層研究所、幌延深地層研究所の研究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、同位体、希ガスなどを計測する。さらに、研究 坑道周辺を対象とした地下水流動・物質移行解析を行い、研究坑道掘削に伴う地下水流動・地下水 水質の変化を評価するとともに、計測結果との比較検討により、地下水流動解析モデルの妥当性を 検討する。

(2) 天然トレーサーの調査

研究坑道内のボーリング孔から希ガス試料を採取する方法(採水法、原位置平衡法)を整備し、 原位置での適用試験を実施して課題の抽出を行う。また、流れが速い地下水の指標となる物質(例 えば、トリチウム、フロンガスなど)について、測定精度の向上を図るとともに流動性の指標とし ての検討を行う。流れが遅い地下水の指標となる物質(拡散の指標:C1-37、Br-81)については、 室内拡散試験を行い、堆積岩・花崗岩における分別メカニズムを調査する。 参考文献

- 池川洋二郎,志田原巧,中川加明一郎,日比野敏(1996):液体トレーサーによる不連続性岩盤中の浸 透経路評価,電力中央研究所研究報告 U96006.
- Winberg, A., Andersson, P., Hermanson, J., Byegård, J., Cvetkovic, V., and Birgersson, L. (2000): Äspö Hard Rock Laboratory. Final report of the first stage of the tracer retention understanding experiments, SKB Technical Report TR-00-07.
- 核燃料サイクル開発機構(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地 層処分研究開発第2次とりまとめ-,分冊1 わが国の地質環境, pp. IV-102-104.

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

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

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

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

- 2-1 -

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

上記のようなことから、実現場でトレーサー試験を実施する前に適切な試験条件を決定するために、 室内試験において試験に用いるトレーサーの吸着挙動を把握することが必要である。昨年度の試験で は、予備的に Cs(I)および Sr(II)を用いた種々の室内試験を実施したが、今年度は現地で用いる吸着 性のトレーサーとして Rb(I)および Ba(II)を用いることになった。このため、今年度の試験では、Rb および Ba の吸着・移行挙動を把握するための試験を実施した。(2.2 吸着・移行試験)

また、トレーサー試験においては先述のように非吸着性トレーサーと収着性トレーサーの挙動の差 が、トレーサーの分配係数を算出するために重要である。試験に用いる非吸着性トレーサーとして、 ウラニン、アミノG酸などの蛍光染料がよく用いられる(Magal et al., 2008)。蛍光染料が頻繁に 用いられるのは、低濃度(~1ppb 程度)までの測定が容易であり、蛍光分光光度計があれば試験現場で も測定が可能であるため、である。一方で蛍光染料は、溶液の条件によっては岩石に対する非吸着性 を維持できない可能性が考えられる。また、本研究でもトレーサー試験を実施する前に予備的に実施 したポンプの駆動試験においては、ポンプを用いて蛍光染料を含む水を循環させた結果、経時的に蛍 光染料の強度が低下していく傾向が観察された。これは、ポンプの特定の部材に蛍光染料が吸着した ためであると推察された。このように、「非吸着性のトレーサー」として取り扱われることが多い蛍 光染料であるが、実際には吸着したり蛍光強度が低下する可能性がある。どのような岩石や部材に対 して、どのような溶液条件であれば非吸着性が担保できないのかを明らかにすることは、今後のトレ ーサー試験を実施する場合のトレーサー選定において有用である。

放射性廃棄物の処分場選定においては、ボーリング孔や地下空洞を掘削して地下水や岩石コアを取 得して調査を実施する。ボーリング孔等を掘削するときには掘削を円滑に実施するために粘土等を混 入した掘削水を循環させることが多く、掘削水と地下水を区別する目的で掘削水に蛍光染料を添加す ることがある。このような使用をする場合も、孔壁や粘土に対して蛍光染料が吸着せず、掘削水と蛍 光染料が同じように移行することが前提となっている。しかし、前述の例のように蛍光染料は粘土等 に対しても吸着する可能性が考えられるため、このような使用法においても非吸着性が担保できる条 件について詳細を検討する必要があると考えられる。また、調査対象地点の透水性によっては、任意 の地点から地下水のサンプルが採取できないケースが想定される。このような場合岩石コアの間隙水 として取得した地下水を、物理的な圧縮などでコアから抽出(圧縮抽水)し、ある地点における地下 水の特性とすることも考えられる。圧縮抽水においても掘削水の混入割合は掘削時に入れた蛍光染料 濃度と、圧縮抽水で得られた間隙水中の蛍光染料濃度を比較することで算出する。このようにして算 出された掘削水の混入割合は、岩石コアの割れ目をつたうときの移動速度が水と蛍光染料で同程度で

- 2-2 -

あることや、岩石マトリクス等に拡散で掘削水の成分が染みこむ場合には蛍光染料の移動速度が他イ オンより速いか同程度であることが前提となって計算されている。蛍光染料は岩石等に吸着する可能 性もあり、かつ分子量が大きいことから、特に拡散においては他イオンや水よりも遅い可能性がある。 このため、特に岩石コアの汚染状況を知るためのトレーサーとして蛍光染料を用いる場合には、岩石 マトリクスに対する水やその他のイオンの拡散係数と蛍光染料の拡散係数を比較する必要がある。

上記のような理由から、本研究では蛍光染料の岩石やポンプ部材に対する吸着試験、あるいは岩石 コアに対する拡散試験を実施した。吸着・拡散試験の結果から、トレーサー試験において蛍光染料が 非吸着性トレーサーとして用いることができる条件や、掘削水の間隙水への混入評価において蛍光染 料を用いることができる可能性について検討した。

2.2 収着および移行試験

ここでは、現地で実施するトレーサー試験の濃度等の条件を適切なものに設定するため、室内で実 施した収着試験や模擬トレーサー試験について報告する。

2.2.1 岩石試料の準備

岩石試料は以下の手順で準備した。

- ・ 岩石試料の入手:花崗岩は昨年度実施したボーリング孔「12MI31 号孔」のコアの健岩部を 2m 程度取得した、以下のように整形して試験に用いた。
- 粉末状試料の準備:上記の岩石コアの一部をタングステンカーバイドのミルで粉砕して、
 岩石の粉末を得た。粉砕中に岩石中鉱物の分別が生じることを避けるため、粉砕は一定量の
 岩石が全て2mmのメッシュを通過するまで実施した。粉砕した岩石は比表面積計を用いて比
 表面積を測定し、0.23 m²/g であることがわかった。
- ディスク状・円柱状試料の整形:花崗岩は外径が 5cm になるようにコア抜きをした後、厚 さが 1cm あるいは 0.5cm のディスク状になるように試料を整形した。また、模擬トレーサー 試験に用いるため外径 14nm 長さ 70mm の円柱状試料を合計 10 本準備した。

さらに、粉末状およびディスク状岩石試料については、収着試験の濃度を決定するために以下の手順で CEC を評価した。

約末状試料の CEC 測定

粉末状試料の CEC 測定は以下の手順で実施した。以下に示す方法は土壌標準分析・測定法委員 会(1986)が示した方法を基にして、岩石粉末用にアレンジしたものである。

・ 溶液の調製:1.0mol/L の塩化アンモニウム溶液を調製し、溶液の pH をアンモニア水また は塩酸を用いて 7.0 に調整した。また、エタノールと純水を 4:1 で混合し、混合液の pH を 硝酸またはアンモニアを用いて 7.0 としたものを準備した。さらに、1.0mol/Lの臭化カリウ ム溶液を調製した。

- ・ アンモニウムイオンによる陽イオン交換サイトの占有:50mLの遠沈管に10gの岩石を秤量 した後、25m1の塩化アンモニウム溶液を添加した。24時間岩石と溶液がまんべんなく接触す るように、緩やかに振盪した。24時間後2000rpm×30分間遠心分離して、上澄み液を取り除 いた。上記の操作をのべ4回繰り返し、陽イオン交換サイトがアンモニウムイオンで占有さ れるようにした。
- ・ 塩化アンモニウム溶液の洗い流し:上記の操作後上澄みを除去した固相に 12.5mL のエタノ
 ール溶液を加えて振り混ぜた。その後、岩石粉末が完全に沈降するまで静置した。岩石の 沈
 降を確認後、上澄み液を除去しさらにエタノール溶液を加えた。上記の操作をのべ4回繰り
 返し、岩石に残った塩化アンモニウム溶液を除去した。
- アンモニウムの脱離:上記の操作終了後、上澄み液を除去した固相に臭化カリウム溶液を 25mL入れ、24時間緩やかに振盪した。24時間後2000rpm×30分間遠心分離して、上澄み液 をサンプルとして取得した。この操作をのべ4回繰り返し4つの試料を得た。
- アンモニウムイオン濃度の定量:上記の操作で得られた溶液に存在するアンモニウムの量 を定量するため、ICによってアンモニウムイオンを定量した。カリウムイオンとアンモニウ ムイオンはピークが近接しており、測定に干渉する可能性が考えられたため、溶液にはクラ ウンエーテルを添加してカリウムのピークを後ろにずらしアンモニウムイオン濃度を定量し た。併せて塩化物イオンの濃度も測定した。

(2) ディスク状試料の CEC 測定

ディスク状試料の CEC 測定は粉末状試料と同様の方法で実施した。粉末状試料の場合と固液比を 合わせるため、塩化アンモニウムや臭化カリウム溶液は岩石 10g に対して 25ml を、エタノール溶 液は岩石 10g に対して 12.5mL を添加した。

いずれの CEC 測定においても、収着と岩石空隙内に拡散したアンモニウムイオンを区別するため、 塩化物イオン濃度を用いて補正を行った。つまり、モル濃度で表したときの塩化物イオン濃度と同 量のアンモニウムイオンが、岩石空隙内に残存していたと考え、塩化物イオン濃度分を抽出された アンモニウムイオン濃度から差し引いた。

 $[\mathbf{NH}_4]_{\rm cor} = [\mathbf{NH}_4] - [\mathbf{Cl}] \tag{1}$

ここで、[NH₄]_{cor}:補正後のアンモニウムイオン濃度(mo1/L)、[NH₄]・[C1]:測定時のアンモニ ウムイオンおよび塩化物イオンの濃度(mo1/L)である。

上記 CEC 測定の結果、粉末試料では岩石 100g あたり 0.25meq、ディスク状試料では岩石 100g あたり 0.11meq の収着容量があることがわかった。

2.2.2 バッチ収着試験(粉末)

先述のように今年度の原位置トレーサー試験においては、収着性のトレーサーとして、Rb(I)および Ba(II)を用いることとした。トレーサー試験を実施する近辺の地下水を分析した結果、地下水に含ま れる Rb および Ba 濃度はそれぞれ、4.0µg/L および 2.0µg/L であった。現地でトレーサー試験を実 施した場合、バックグランドの流れ等によりトレーサー溶液は希釈されるため、収着性のトレーサー を検出するためには添加濃度は高い方が望ましい。しかし、特にバリウムは炭酸塩や硫酸塩の水への 溶解度が低く濃度をあまり上げられないことに加えて、濃度を上げることによって岩石への収着サイ トが飽和し、トレーサー試験における遅延等が観察されなくなる可能性がある。このため、ここでは Rb・Ba 濃度を地下水中の濃度の 500 倍である、2.0mg/L および 1.0mg/L について岩石と接触させる収 着試験と岩石を入れないで模擬地下水中での安定性を確認するブランク試験を実施した。

(1) 試験手順

試験の手順は以下の通りである。

・ 模擬地下水の調製:模擬地下水は瑞浪地域で得られた地下水組成を基にして、純水に試薬 を添加して模擬地下水を調製した。調製に用いた試薬とその量を表 2.2.2-1 に示した。表に 示した試薬のうち、①に分類したものは 100 倍濃縮液を作製し、その 10mL を 1000mL のメス フラスコ内で 800mL 程度の純水と混ぜ合わせた。CaCl₂および NaHCO₃ についてもそれぞれ 100 倍濃縮した溶液を調製し、②の CaCl₂ 溶液を加えよく振り混ぜたあと、③NaHCO₃ 溶液を加え てよく振り混ぜた。このあと、予め秤量した④NaSiO₃粉末を少しずつ加えて振り混ぜた。目 視で試薬の溶解を確認した後、溶液を 0.45 µm のフィルタでろ過し、ろ液を模擬地下水とし て使用した。試薬の量から算出した各イオンの濃度を表 2.2.2-2 にまとめた。

薬品名	必要量(g/1L)	分類
Na Cl	0.24	1
Na ₂ SO ₄	0.006	1
KCI	0.0012	1
MgSO4•7H ₂ O	0.002	1
Na F	0.019	1
Ca Cl ₂	0.08	2
Na HCO3	0.045	3
NaSiO₃•9H₂O	0.07	4

表 2.2.2-1 収着試験に用いた模擬地下水調製用試薬の一覧

イオン濃度(mg/L) イオン種類 Na Κ Ca Mg Si F Cl SO₄ HCO₃ 模擬地下水 120.8 0.6 29.5 0.2 6.8 8.5 198.7 4.8 29.9 12MI30平均值 124.7 0.6 28.9 0.2 6.9 8.6 197.3 4.8 32.7

表 2.2.2-2 調製した模擬地下水の組成

- ストック溶液の調製:試薬の塩化ルビジウムおよび塩化バリウムを純水に溶解して、Rb あるいは Ba を 1000mg/L 含むストック溶液を調製した。特にバリウムについては、大気中の炭酸が溶解することで炭酸バリウムが沈殿する可能性があるため、ストック溶液は試験直前に調製した。
- ・ 岩石の秤量と模擬地下水との接触:準備した岩石粉末 10g を 100mL のポリプロピレン(PP) 製容器に入れ、ここに模擬地下水 100mL を添加した。pH が現場の地下水と近い 8.0±0.1 の 範囲になるよう NaOH または HC1 を添加して調整した。その後シェイカーで緩やかに振盪し、 pH を上記の範囲に調整しながら1週間岩石と模擬地下水を接触させた。また、岩石を含まな いブランク試験用の試料も併せて調製したほか、岩石からの Rb や Ba の溶出量を調べるため、 ストック溶液を添加しない「岩石ブランク」用試料も調製した。
- ストック溶液の添加: Rb および Ba がそれぞれ 2mg/L、1mg/L となるようにストック溶液を 添加した。添加した後に pH を調整し、シェイカーで緩やかに撹拌しながら所定の時間経過 後、以下のようなサンプリングを行った。
- サンプリング:サンプリング前にサンプルをシェイカーから卓上に置き、岩石を沈降させた。その後上澄み溶液のうち0.5mLを取り、13mmの親水性PTFEフィルタをリンスした後(このときフィルタを通過した液は廃棄)、さらにリンス後のフィルタを使って0.5mLのサンプルをろ過した。ろ液のうち100µLを予め1%硝酸9.9mLを入れた遠沈管に入れ、良く振り混ぜた。岩石を含まないブランク試料やストック溶液を添加しない岩石ブランク溶液についてもサンプルと同じタイミング・手順でサンプリングした。
- ・ 濃度測定:上記で準備した 100 倍希釈溶液をさらに適切な濃度に希釈し、ICP-MS をもちい
 て Rb や Ba 濃度を定量した。
- (2) 試験結果と考察

バッチ収着試験における Rb および Ba 濃度の経時変化を図 2.2.2-1 および図 2.2.2-2 に示した。 図にはブランク試験の結果も併せて示している。特に Ba においては炭酸や硫酸塩の沈殿が生じる 可能性が懸念されたが、図からわかるようにブランク試験の Ba 濃度は目標値とした 1.0mg/L でほ ぼ一定となっており、試験溶液中にイオンとして安定に存在していることを確認することができた。 このため、現地でのトレーサー試験でも、この濃度であれば同様の状況が再現されることが期待さ れた。また、岩石ブランク試験において溶液中に存在する Rb・Ba の濃度はそれぞれ 0.035 および 0.044mg/L であり、添加した濃度の 1.5%および 4%に留まった。このため、岩石から溶出する Rb・Ba は収着試験の結果に大きな影響を与えることはないと考えられた。

さらに本試験のデータから算出された分配係数の経時変化を図 2.2.2-3 および図 2.2.2-4 に示し た。Rb および Ba ともに岩石と接触して最初の 1 時間で濃度は大きく低下し、Rb については分配係 数が 2.5 (mL/g)程度にまで、Ba については 10~12(mL/g)程度にまで上昇することがわかった。以 上のことから、Rb・Ba 濃度をそれぞれ地下水中の濃度の 500 倍程度に相当する、2.0 および 1.0mg/L とした場合でも有意な収着が観察されることから、トレーサー試験においてもある程度の遅延等が 見込める可能性があると推察された。



図 2.2.2-1 粉末状岩石試料への収着試験における上澄み液中 Rb 濃度の経時変化



図 2.2.2-2 粉末状岩石試料への収着試験における上澄み液中 Ba 濃度の経時変化

- 2-7 -



図 2.2.2-3 粉末状岩 石試料への収着試験における Rb 分配係数の経時変化



図 2.2.2-4 粉末状岩石試料への収着試験における Ba 分配係数の経時変化

2.2.3 バッチ収着試験(ディスク)

2.2.2 では粉砕した岩石粉末を用いてバッチ試験を実施し、分配係数の経時変化を算出した。ここでは、より実際の割れ目に近いと考えられるディスク状の岩石試料を用いてバッチ収着試験を実施し、 分配係数の経時変化を明らかにした。

(1) 試験手順

ディスク状の試料を用いた収着試験の手順は以下の通りである。

- ・ 模擬地下水およびストック溶液の調製:2.2.2 に示した手順と同様の手順で模擬地下水および Rb・Ba のストック溶液を調製した。
- ディスク状試料と模擬地下水の接触:ディスク状岩石(Φ5cm、厚さ1cm)の平均重量は52g であった。このため、添加する模擬地下水量は500mLとし、粉末状の岩石を用いたバッチ収 着試験と固液比を揃えるようにした。岩石を容量600mLのふた付きPP製容器に静置し、容器 壁に立てかけるように岩石を入れた。容器には撹拌子を入れ、pHの調整時など必要時に溶液 が撹拌できるようにした。pHが8.0±0.1になるように調整しながら(NaOHまたはHC1を添加 し)、岩石と模擬地下水を1週間接触させた。
- ストック溶液の添加とサンプリング:岩石とディスク状試料が接触してから1週間後、ストック溶液を添加し、Rb・Baの濃度をそれぞれ2.0および1.0mg/Lとした。所定の時間経過後、2.2.2 に示した粉末状岩石と同じ手順でサンプリングを実施した。ディスク状試料においては見かけ上の収着が平衡に達するのに時間がかかることが考えられたため、数ヶ月間に亘って試験を実施した。試験期間中大気中の二酸化炭素が溶液中のBa濃度等に影響を与えるのを防ぐため、容器はプラスティック製のバッグの中に入れ封をし、バッグ内には二酸化炭素吸収剤(リソライム)を入れた。また、試験期間中1回/2週程度の頻度で溶液のpHを確認し、必要に応じて8.0±0.1となるように調整した。
- (2) 試験結果および考察

ディスク状の試料を用いた収着試験における、Rb および Ba 濃度の経時変化を図 2.2.3-1 および 図 2.2.3-2 に示した。Rb・Ba ともに、約 1000 時間程度をかけて時間に対して直線的に濃度が低下 したあと、濃度減少の勾配が緩やかになっていることがわかる。図 2.2.3-3 および図 2.2.3-4 には 得られたデータから算出した分配係数の経時変化を示した。分配係数は Rb の 1000 時間経過後で約 1.0 ml/g 程度、Ba の 1000 時間経過後で約 2.5mL/g 程度となった。これらの値は粉末で取得した値 の 20~40%程度の値である。一方ディスク状岩石と Rb や Ba が接触してから 24 時間後の分配係数は 約 0.1 程度であり、岩石粉末を用いた収着試験から得られた分配係数と比べて顕著に小さな値とな った。また、ブランク試験の結果を見てみると、Rb・Ba 共に試験期間中(~2000 時間)安定して 初期に添加した程度の濃度が得られていることがわかった。このため、少なくとも試験を実施した

- 2-9 -

模擬地下水環境下では Rb・Ba がそれぞれ 2.0 および 1.0mg/L の濃度で溶液中に安定的に存在できることが示された。

ディスク状の岩石試料において、Rb や Ba の濃度減少に時間がかかるのは、ディスク表面にイオ ンが吸着してから、それが岩石内部へと拡散(吸収)するプロセスが濃度の経時変化の主要なメカ ニズムとなっているためであると推察される。今後収着量が増大していく可能性もあるが、試験開 始から 80 日経過後の時点で得られている分配係数は、上述のように粉末の分配係数と比較して低 い値であり、岩石が物的な粉砕によりバルクの場合よりも表面積が拡がる等の効果から岩石単位重 量あたりの分配係数は増加していると考えられる。また、分配係数が Rb で 1.0、Ba で 2.5 の値に 達するまでに 1000 時間程度を要していることから、実際の処分や試験時間を長く確保できるよう なトレーサー試験では、上記程度の大きな分配係数が期待できるものの、~1 日程度で終了する試 験においては分配係数は極めて小さく、遅延の効果が顕著ではない可能性が考えられた。上記のこ とから次節(2.2.4)では、実際のトレーサー試験を模擬した条件下で実際に岩石表面に溶液を流 す模擬トレーサー試験を実施し、現実的に試験が実施可能な条件下で非吸着性および収着性トレー サーがどのような挙動をするかを把握した。



図 2.2.3-1 ディスク状岩石試料への収着試験における上澄み溶液中 Rb 濃度経時変化



図 2.2.3-2 ディスク状岩石試料への収着試験における上澄み溶液中 Ba 濃度経時変化



図 2.2.3-3 ディスク状岩石試料への収着試験結果から算出した Rb 分配係数の経時変化



図 2.2.3-4 ディスク状岩石試料への収着試験結果から算出した Ba 分配係数の経時変化

2.2.4 模擬トレーサー試験

バッチ試験で Rb および Ba の収着挙動を把握した後、実験室で模擬的なトレーサー試験を実施し、 現場で実施する濃度等の条件について検討した。

(1) 試験手順

試験の手順は以下の通りである。

- 円柱状岩石の準備:模擬的なトレーサー試験を実施するため、花崗岩のコア表面を水が流れながら接触するような試験装置を準備した。まず花崗岩は得られたコアから、外径 14mm、長さ 70mm のコアを十本以上切りだした。このコアを入れたときに容器壁とコアの間に 1mmの隙間ができるように、1mm のスペーサーを入れたカラムを作製し、これにコアを入れた。コアを入れた状態のカラムを図 2.2.4-1 に示した。模擬トレーサー試験では、このカラムを10本連結して試料水を流した(図 2.2.4-2)。これによって長さ 70cm のコア表面を 1mm の隙間を試料が通過していく試験系を構築することができた。
- ・ 模擬地下水によるコンディショニング:2.2.2 に示したのと同じ方法で模擬地下水を調製した。岩石を入れ、10本連結したカラムに約0.5mL/minの速度で模擬地下水を通水した。模擬地下水は12時間程度通水した。その後流速が所定の値となるように、ポンプ出力を調整し、 模擬地下水でのコンディショニングを終了した。

- 2-12 -

- 試験溶液の調製:模擬地下水をベースとして、Rb あるいは Ba のストック溶液を加え、Rb や Ba が所定の濃度(それぞれ 2.0 および 1.0mg/L)となるような溶液を調製した。模擬トレーサー試験では、非吸着性のトレーサーとして重水を用いることとし、試験溶液 100mL に対して 10 µ L の重水を加えた。これによって試験溶液中の δ D 値は約 550(‰)になった。
- 試験の実施1:カラム手前のバルブを閉鎖した上でカラム手前の配管を外した。ポンプの吸い込み口を上記の試験溶液へと移し、カラム手前の配管までの流路を試験溶液で満たした。その後配管を再度接続し、ポンプを稼働させると同時に、カラム手前のバルブを開け、ポンプ稼働開始時間を試験開始時間とした。ポンプの流速は1.0mL/minとした。カラム内で岩石と接触している水は約50mL程度であるため、1.0mL/minの場合には岩石と試験水の接触時間は50分程度である。これは、実際の現場試験においてトレーサー試験溶液が岩石と接触する時間と同程度のオーダーである。最初の50mL程度には重水・Rb・Baが検出されない可能性が高いことからこれを別途取り分けた後、フラクションコレクターを動作させ50mL以降の溶液を10mLずつ合計約500mLが流れるまで取り分けた。

試験の実施2:また、上記とは別にパルス状に試験溶液を加える模擬トレーサー試験を実施した。まずポンプやカラム手前の流路を試験溶液で十分に置換した後、模擬地下水でのコンディショニングが終了した岩石カラムに対して、流速1.0mL/minで試験溶液を10分間流した。その後カラム入口のバルブを閉じ、ポンプ内部やカラム手前の流路を十分に模擬地下水で置換し、同じ流速1.0mL/minでカラムに模擬地下水を流した。40mLの模擬地下水を流した後、この試験ではピーク位置の差異を捉えるため5mL ずつのフラクションで合計400mLのカラムから流出する液を取得した。

分析:試験終了後容器+溶液の重量を測定して、各フラクションで採取した溶液量を評価した。各フラクション約 10mL または 5mL のうち 2mL をガラスビンに注ぎ分け、Liquid-Water Isotope analyzer (Los Gatos Research)を用いて試料の δD 値を測定した。また、残りの溶液を適切に希釈し、ICP-MS を用いて Rb あるいは Ba 濃度を測定した。



図 2.2.4-1 模擬トレーサー試験に用いた柱状岩石充填カラム

※ カラムにはスペーサーがついており、岩石表面とカラム壁の間には約 1mm の隙間ができるように なっている(右図)。岩石柱を充填したカラム(左図)を連結し、模擬的な岩石割れ目とした。



図 2.2.4-2 模擬トレーサー試験の試験系

(2) 結果と考察

模擬トレーサー試験で得られた、流量と重水・Rb・Ba 濃度の関係を図 2.2.4-3 に示した。図の縦 軸の濃度は、カラムに流した試験溶液中の重水・Rb・Ba 濃度を 100%として規格化した値を示して いる。図から分かるように、非吸着性のトレーサーである重水は流量 50mL 程度でシャープに立ち 上がっており、カラムのスペースが 50mL 程度であることがわかる。これに対して、Rb・Ba は遅れ て 100%に向けて濃度が増加していく様子が観察された。流量-濃度の曲線において Rb・Ba の曲線と 重水の曲線に囲まれる部分の面積が収着による遅延の効果を表しており、ここから分配係数を算出 することができる。算出した分配係数は Rb で 0.14、Ba で 0.40 mL/g になった。これは、ディスク 状の試料において得られた分配係数の経時変化のうち、24 時間程度で得られた値に近い値となった。

ディスク状岩石試料への 24 時間後の分配係数と、模擬トレーサー試験で得られた分配係数がほ ぼ同程度の値であることから、今回の試験のように拡散係数が小さいと考えられる岩石に対して短 時間で終了するトレーサー試験では、実際に岩石が持つトータルの収着能力は評価されず、岩石-地下水界面近傍の核種収着能力を限定的に取得できることがわかる。岩石の種類やトレーサー試験 がどの程度の期間をかけて実施されたかを検討し、これに室内バッチ試験等の情報を併せて、どの 値を実際の評価に用いるのかを検討することが必要である。



図 2.2.4-3 模擬トレーサー試験の結果(試験溶液を連続的に添加)

パルス状に試験溶液を入れた場合の流量と重水・Rb・Ba 濃度の関係を図 2.2.4-4 に示した。図 の回収率とは、カラムに投入した 10mL の試験溶液中に含まれる重水・Rb・Ba を 100%とした場合、 あるフラクションに含まれるそれぞれの割合を示したものである。図からわかるように、Rb にお いて重水のピークからわずかの遅れが観察されたが、ピーク位置についてあまり顕著な差がみら れないことがわかる。このため、今回設定したような試験条件に似た条件で試験を実施した場合、 ピーク位置から分配係数を議論できるほどの時間遅れは生じない可能性が高いと考えられる。一 方でピーク形状については重水で最もシャープなピークが観察され、Rb・Ba などの収着性イオン はブロードなピークとなり、ピーク高さも低いことがわかる。このため、現場で実施する試験に おいてもこれらの情報から割れ目の核種遅延能力について知見を得ていくことが必要であると考 えられる。



図 2.2.4-4 模擬トレーサー試験の結果(試験溶液をパルス状に添加)

2.2.5 模擬単孔式トレーサー試験

今年度の現地試験においては、トレーサーを1つの孔から投入して他の孔から回収する「孔間式ト レーサー試験」の他に、一つの孔から割れ目にトレーサー・チェイサーを順次流して、さらにこの孔 から溶液を回収して分析する「単孔式トレーサー」試験を実施する予定である。このため、実験室で 同様の試験を現場試験を模擬した条件で実施し、単孔式トレーサー試験の実際のデータ解析に向けて 予備的なデータを提供するとともに、単孔式トレーサー試験においてどのような情報が得られるのか を検討した。

- (1) 試験手順
 - 模擬単孔式試験の手順は以下の通りである。
 - ・ 円柱状岩石/カラムの準備:試験に用いる円柱状の岩石を入れたカラムは、模擬トレーサー試験で用いたものと同じものを使用した。カラムについては模擬トレーサー試験と同様に、 +分量の模擬地下水を流した後試験に使用した。
 - 試験溶液の添加:試験開始時の実験系のセットアップを図 2.2.5-1 に示した。試験溶液は 模擬トレーサー試験に示したのと同様に、模擬地下水をベースとして Rb:2.0mg/L、Ba:
 1.0mg/L、重水:10µL/100mL(模擬地下水)となるよう、ストック溶液や重水を添加したものを使用した。ポンプの吸い込み口を試験溶液に入れ、流速 1.0mL/min で溶液をカラムへと 送液した。10分後ポンプを止め、カラム入口のバルブを閉鎖した。
 - ・ チェイサーの添加:ポンプの入口を、模擬地下水を満たしたビーカーに移し、ポンプを作 動させてカラム入口のバルブを開けた。流速 1.0mL/min で 40 分間模擬地下水をカラムに流した。
 - ポンプ等のつなぎ替え:今まで溶液を流してきた入口とは反対側のカラムの口にポンプを 接続し、カラムの入口側だったところにはフラクションコレクタを接続した(図 2.2.5-1)。
 - ・ 回収試験:今までカラムの出口側だった方から、流速1.0mL/minで模擬地下水を送液し、 入口側だった方からでてくる溶液を回収した。5mL ずつを80本合計400mL を回収して試験を 終了した。
 - 分析:試験終了後容器+溶液の重量を測定して、各フラクションで採取した溶液量を評価した。各フラクション約 10mL または 5mL のうち 2mL をガラスビンに注ぎ分け、Liquid-Water Isotope analyzer (Los Gatos Research)を用いて試料の δD 値を測定した。また、残りの溶液を適切に希釈し、ICP-MS を用いて Rb あるいは Ba 濃度を測定した。



試験溶液・チェイサー添加時

溶液回収時

図 2.2.5-1 模擬単孔式トレーサー試験の試験系概念図

(2) 結果と考察

模擬単孔式試験で得られた、流量と重水・Rb・Ba 濃度の関係を図 2.2.5-2 に示した。図の縦軸で ある回収率とは、図 2.2.4-3 と同様に、10mL の試験溶液に含まれる重水・Rb・Ba の量を 100%とし たときに各フラクションに含まれる量を百分率で表したものである。



図 2.2.5-2 模擬単孔式トレーサー試験の結果

チェイサーである模擬地下水を 40mL 投入後、逆方向から模擬地下水で溶液を流出させると、 チェイサー投入量と同じ液量である 40mL のところに、重水・Rb・Ba のピークが生じた。重水の ピークが 40mL を中心に液量に対してほぼ対称に分布しているのに対し、Rb・Ba では一つ前のフ ラクション (約 35mL のフラクション) にショルダーが生じていることがわかる。単孔式トレーサ ー試験では、トレーサーを投入したのと同じ孔から溶液を回収する。収着性のトレーサーはトレ ーサーおよびチェイサー投入時に非吸着性トレーサーに対して遅れが生じるため、孔間式トレー サー試験と異なり非吸着性トレーサーより前に収着性トレーサーが溶出する。試験で観察された ショルダーはこの遅れによるものであると考えられる。収着性であることによる特徴が観察され たものの、本試験条件下では非吸着性トレーサーとの差異はわずかであり、非吸着性トレーサー 近辺のフラクションにわずかに差異が生じるだけである。現場での単孔式トレーサー試験でも同 様の現象が起きることが推察されるため、非吸着性トレーサーのピークがどのフラクション近辺 に生じるかを予測し、この付近では密にフラクションを取っていく必要があると考えられる。ま た、先述のディスク状収着試験の結果と併せて考えると、岩石-核種の収着時間が長いオーダーで 取れれば、より非吸着性と収着性トレーサーの差異は明確になる可能性がある。しかし、大きな 分配係数が期待できるのは 1000 時間=40 日程度が経過した後であり、実際の試験を考えると流速 を遅くして収着の増大を期待することは現実的ではない。また、収着試験では Ba の方が Rb に比 べて高い収着性を示した。模擬単孔式トレーサー試験では、Ba は Rb に対してショルダーがより 明瞭であり、ピーク後のテーリングも大きい。ショルダーやテーリングの状態を解析することで、 対象とした割れ目の核種遅延能力を明らかにすることができる可能性がある。単孔式トレーサー 試験の解析結果については、第6章に詳しい。

2.2.6 まとめ

室内試験では、Rb・Ba を用いた収着・移行試験を実施し、以下のような知見を得ることができた

- ・ 現地試験における Rb/Ba の濃度について:ブランク試験、および収着・移行試験の結果から、Rb: 2mg/L、Ba: 1mg/Lを現地試験におけるトレーサー濃度として提案した。
- ・ 分配係数の大きさについて:各試験で得られた分配係数の値を表 2.2.6-1 に示した。表に示したように、Rbの分配係数は 0.004~3.0 mL/g、Baの分配係数は 0.01~12.0 mL/g 程度となり、いずれも現地トレーサー試験で得られた分配係数の値が最小となった。この値は室内試験におけるディスク状岩石への収着試験における 24 時間後の結果、室内模擬トレーサー試験における値と比較的近かった。ディスク状岩石への収着試験の結果から、現地トレーサー試験で得られる分配係数が低いことの一つの要因として、試験時間が短いことにより、液一固界面における反応に続くマトリクス拡散の影響が十分に評価されていないことが挙げられる。今後さらに種々の条件下で試験を実施し、どのような条件下ではどのような分配係数が取得されているのかを検討していく予定である。

<u></u> =++ E수 - + - >+	分配係数(mL/g)			
	Rb	Ba		
バッチ・粉末	3	12		
バッチ・ディスク状(24時間)	0.1	0.1		
バッチ・ディスク状(2000時間)	0.9	2.5		
模擬トレーサー試験	0.14	0.4		
単孔式トレーサ試験(現地)	0.005~0.022	0.01~0.228		

表 2.2.6-1 取得した分配係数のまとめ

2.3 蛍光染料の非吸着性トレーサーとしての有用性検討

2.1 に記述したように、蛍光染料は取り扱いがしやすく、現場での低濃度での測定が容易であるた め、しばしば非吸着性のトレーサーとして使用され、トレーサー試験の他にボーリング掘削時に用い る掘削水の、地下水や岩石コア間隙水に対する汚染度評価などに用いられている。しかし、実際の現 場においては蛍光染料の投入量と現場で回収された溶液における濃度が整合しないなどの経験が報告 されている。著者らのグループでは、この原因の一つが蛍光染料の発光挙動のpH 依存性にあると推察 し、試験や掘削現場でも容易に pH を調整して蛍光強度を測定するための手順を確立した(柏谷ら, 2010)。今回そして今後種々の現場で蛍光染料を非吸着性トレーサーとして取り扱う可能性があり、 今後測定手法の確立だけではなくどのような条件下であれば、蛍光染料が非吸着性のトレーサーとし て取り扱えるのか、それらのサンプルを保管・輸送・分析するためにはどのような点に留意する必要 があるのか、を改めて検討していく必要がある。そこで、本報告では、①蛍光染料の熱に対する耐性 (2.3.1)、②光に対する耐性(2.3.2)、③岩石や粘土に対する吸着挙動(2.3.3)、④ポンプ部材に対する 吸着挙動(2.3.4)、⑤岩石マトリクスにおける拡散挙動(2.3.5)、を明らかにし、これらの結果から、 どのような条件下では蛍光染料が有用であるかを提案することを目的として検討を実施した。

試験に用いた蛍光染料は、ウラニン(3', 6' - ジヒドロキスシスピロ[3H-イソベンゾフラン-1,9' -キサンテン]-3-オンニナトリウム塩)・エオシン(2',4',5',7' - テトラブロモ -3',6'-ジヒドロキスシスピロ[イソベンゾフラン-1(3H),9' -[9H]キサンテン]-3-オンニ ナトリウム塩)・ナフチオン酸ナトリウム(4-アミノ-1-ナフタレンスルホン酸-ナトリウム塩四 水和物)・アミノG酸(7-アミノ-1,3-ナフタレンスルホン酸モノカリウム水和物)の4種類であ り、これらはトレーサー試験やボーリング掘削に頻繁に使用される蛍光染料である。それぞれの蛍光 染料の構造式を図2.3.1-1に示した。

2.3.1 蛍光染料の熱に対する耐性試験

通常トレーサー試験等が行われるような地下環境で、蛍光染料が高温に曝される状況は想定しにく いが、トレーサー試験等に用いるポンプの内部では、溶液が 60℃程度の高温部に接触する可能性があ る。ここでは、上記のように高温のポンプ部材に接触したときの蛍光染料の安定性を明らかにするた め、上述の4種類の蛍光染料を高温に曝露する試験を実施した。

(1) 試驗手順

試験の手順は以下の通りである。

・ 蛍光染料ストック溶液の準備:市販のウラニン・エオシン・ナフチオン酸ナトリウム(以下 NAP と記述)・アミノG酸(以下 AG と記述)それぞれ 0.1g を純水 100mL に溶解し、各濃度 1000mg/L のストック溶液とした。ストック溶液はアルミホイルで遮光し、使用まで冷蔵庫

- 2-20 -

で保管した。

- 溶液の調製:先述(2.2.2)の模擬地下水を調製し、模擬地下水に蛍光染料の濃度が 4mg/L となるようにストック溶液を添加した。溶液はガラス容器に入れ、60℃に温度を調整した恒 温槽に入れた。
- ・ サンプリング:所定の時間経過後、ガラス容器を恒温槽からとりだし、上澄み 0.1mL を採取した。採取した上澄み液は予め 9.9mL の 0.05M ホウ砂水溶液をいれたガラスビンに入れ、 このガラスビンは測定まで冷暗所に保管した。ホウ砂水溶液は溶液の pH を蛍光染料濃度の測 定に適した 9 付近に保つことができるうえ、対象となる励起・蛍光波長の光に対して吸収等 がないことを確認している(柏谷ら, 2010)。

花崗岩は昨年度実施したボーリング孔「12MI31 号孔」のコアの健岩部を 2m 程度取得した、以下のように整形して試験に用いた。

分析: 蛍光分光光度計を用いて、上記のサンプルに含まれる蛍光染料濃度を定量した。定量に用いた(励起/蛍光波長)は、それぞれ、ウラニン(491.0/512.0 nm)、エオシン(515.0/535.0 nm)、NAP(315.0/420.0 nm)、AG(300.0/450.0 nm)である。





図 2.3.1-1 試験に用いた 4 種の蛍光染料の構造式

 4 種類の蛍光染料を 60℃で保管したときの蛍光強度の経時変化を図 2.3.1-2 に示した。図からわ かるように、60℃で保管しても 96 時間以内では蛍光強度には顕著な変化がない。このため、ポン プの発熱部に蛍光染料が接触したとしても、それによって蛍光染料の濃度や強度が変化する可能性 は低いと考えられる。



図 2.3.1-2 60℃で保管した4種類の蛍光染料の蛍光強度経時変化

2.3.2 蛍光染料の光に対する耐性試験

蛍光染料は日光等への曝露で色が消失する可能性がしてきされており、サンプルを保管・輸送する際の影響が懸念される。ここでは、室外および室内で日光や蛍光灯に曝露された場合の蛍光染料の発光強度変化を示し、蛍光染料濃度測定用サンプルの取り扱いや分析における留意点を明らかにした。

(1) 試験手順

試験の手順は以下の通りである。

- ・ 蛍光染料ストック溶液の準備および各蛍光染料溶液の準備:2.3.1 に示したのと同じ手順 で蛍光染料ストック溶液を調製した。本試験では純水にストック溶液を添加して試験溶液を 調製した。蛍光染料の強度は10mg/Lになるようにした。調製した試験溶液は容器による差異 を見るため、ポリプロピレン(PP)製あるいはガラスボトルに50mLを取り分けた。
- 試験の開始とサンプリング: 蛍光染料溶液を入れた試料の一部は屋外で日光に曝露させ、
 一部は室内で蛍光灯に曝露させた。サンプリングは、2.3.1 と同じ手順で、実施し取得した

- 2-22 -

サンプルは測定まで冷暗所で保管した。

- 分析: 2.3.1 に記載したのと同じやり方でそれぞれのサンプルに含まれる蛍光染料強度を 測定した。また、試験開始前の溶液および、試験開始から7日後の試料のうちガラス容器で 試験した試料については、総炭素濃度(TOC)についても分析した。
- (2) 結果と考察

ウラニンを光に曝露した場合の、蛍光強度の経時変化を図 2.3.2-1 に示した。屋外で日光に曝露 した場合、ウラニンの蛍光強度は大きく低下し、1 日後には 10%程度、2 日後には 1%程度となり、7 日後には 0.5%以下にまで低下した。この結果から、日光への曝露はある程度短時間でも蛍光強度を 大きく低下させる可能性があり、屋外でサンプルを取り扱う必要があるときには留意が必要である。 また、7 日後の試料における TOC 濃度は試験前の TOC 濃度に比べて 72%に低下していることがわか った(表 2.3.2-1)。このため、約 30%程度の有機物については、日光への曝露によって性状が変 化し分解・揮発した可能性がある。しかし、30%の TOC 濃度低下は、蛍光強度が 99.5%減少してい ることを説明するのには十分ではなく、蛍光染料の多くは蛍光を発する箇所のみが日光への曝露に よって分解しているものと推察される。



図 2.3.2-1 ウラニン蛍光強度の経時変化(室内+屋外試験の結果) 縦軸の蛍光強度は光への曝露前の蛍光強度を 100%として正規化している

屋内で保管した試料のみのウラニンの蛍光強度の経時変化を図 2.3.2-2 に示した。図 2.3.2-1 の ように屋外での結果と比較すると変化は顕著ではないが、室内で蛍光灯に曝露した場合でも蛍光強 度は低下することがわかる。蛍光灯への曝露試験の結果を見ると、PP 容器の方がガラス容器と比較 して濃度低下が大きい。しかし、7 日後の TOC 濃度を比較すると両者にはほとんど差が見られない。 このため、容器による差異は蛍光染料が容器壁に吸着した影響ではなく、蛍光染料の蛍光を発する 箇所の分解に係わる紫外線等の透過量が容器によって異なるためであると考えられる。PP 容器の場 合で1 日蛍光灯に曝露した場合、ウラニンの蛍光強度は蛍光灯曝露前の 98%に 7 日後には 91%程度 に低下した。このため、室内であっても光をあてるような操作は蛍光強度の低下を招く可能性があ るため、できるだけ避けた方が良いことがわかる。このため、輸送などは光が当たりにくいように して実施する必要がある。しかし、1 日曝露して低下する蛍光染料強度は今回の試験条件で 2%程 度であったことから、短時間であれば室内での溶液取り分けなどの操作に暗室を使うなどの作業は 必要がないと考えられる。



図 2.3.2-2 ウラニン蛍光強度の経時変化(室内試験の結果) 縦軸の蛍光強度は光への曝露前の蛍光強度を 100%として正規化している

エオシンにおける屋外・室内での光曝露における蛍光強度経時変化をそれぞれ、図 2.3.2-3 および 4 に、NAP および AG における結果を図 2.3.2-5~8 にまとめた。さらに、7 日後の蛍光強度や TOC 濃度の分析結果を表 2.3.2-1 にまとめた。同じ日光への曝露試験、24 時間経過後の蛍光強度データを比較すると、ウラニンが 4.6%、エオシンが 0.4%、NAP が 11.7%、AG が 10.7%であった。この結果から、4 種類の蛍光染料のうちエオシンは特に光への耐性が弱く日光に曝露された場合 1 日でほぼ全ての蛍光を発する箇所が失われると考えられる。一方、NAP および AG は比較的光に対して耐性があることがわかる。実際に室内での蛍光灯への曝露試験では、これら 2 つの蛍光染料では蛍光強度

- 2-24 -

の低下がほとんど観察されなかった。このため、これらの蛍光染料を用いた場合、室内での操作で あれば光の影響にそれほど注意を払う必要はないと考えられる。

以上光に対する蛍光染料の耐性試験を実施した結果、以下のことが明らかになった。

- 今回検討した4つの蛍光染料を日光に曝露すると、蛍光強度が大きく低下することがわかった。TOC 濃度の低下は蛍光強度の低下ほど顕著でなかったことから、これは日光によって 蛍光線量中の蛍光を発する箇所が分解されるためであると推察される。このため、トレーサー試験等で蛍光染料を用いる場合には、試料を屋外で取り扱う操作は極力避けた方が良い。
- 4 つの蛍光染料のうち、ウラニン・エオシンについては室内で蛍光灯へ曝露した場合でも わずかに蛍光強度が低下する傾向が観察された。このため、室内の作業であっても積極的に 光に曝露するような操作はできるだけ避けた方が良い。
- ・ 蛍光染料の中で、光に対して最も耐性がないのはエオシンであり、次いでウラニンが光への耐性がないと考えられる。NAP および AG は 4 つの染料のなかでは比較的光への耐性がある と考えられる。



図 2.3.2-3 エオシン蛍光強度の経時変化(屋外試験の結果) 縦軸の蛍光強度は光への曝露前の蛍光強度を 100%として正規化している



図 2.3.2-4 エオシン蛍光強度の経時変化(屋内試験の結果) 縦軸の蛍光強度は光への曝露前の蛍光強度を 100%として正規化している



図 2.3.2-5 NAP 蛍光強度の経時変化(屋外試験の結果) 縦軸の蛍光強度は光への曝露前の蛍光強度を 100%として正規化している



図 2.3.2-6 NAP 蛍光強度の経時変化(屋内試験の結果) 縦軸の蛍光強度は光への曝露前の蛍光強度を 100%として正規化している



図 2.3.2-7 AG 蛍光強度の経時変化(屋外試験の結果) 縦軸の蛍光強度は光への曝露前の蛍光強度を 100%として正規化している



図 2.3.2-8 AG 蛍光強度の経時変化(屋内試験の結果) 縦軸の蛍光強度は光への曝露前の蛍光強度を 100%として正規化している

表 2.3.2-1 光曝露から7日経過後の蛍光強度、総有機炭素濃度のまとめ

曝露条件	測定項目	ウラニン	エオシン	アミノG	NAP
屋内	蛍光強度(%)	97	94	100	100
(蛍光灯曝露)	総有機炭素濃度(%)	99	100	101	100
屋外	蛍光強度(%)	0.2	0.02	0.1	0.5
(日光曝露)	総有機炭素濃度(%)	72	85	87	90

2.3.3 岩石や粘土に対する吸着挙動

岩石や粘土に対して蛍光染料が非吸着性を保てる条件について考察するため、岩石や粘土に対する 吸着試験を実施した。ウラニンとエオシン、NAP と AG はその挙動が似ていることから、ここではウラ ニンと AG を対象として吸着試験を実施した。

(1) 試験手順

試験の手順は以下の通りである。

- ・ 蛍光染料ストック溶液の準備:2.3.1 に示したのと同じ手順で蛍光染料ストック溶液を調 製した。
- ・ 模擬海水の準備:岩石や粘土が接触する地下水の塩分濃度が蛍光染料の吸着挙動に与える 影響を明らかにするため、塩分濃度を変化させた溶液での吸着試験を実施した。模擬海水は、 純水に対して表 2.3.3-1に示した試薬を溶解させて調製した。その結果得られる模擬地下水

における主要イオンの濃度を表 2.3.3-2 に示した。

- 岩石・粘土粉末の準備:吸着試験に用いる岩石粉末として幌延地域の珪質泥岩コアあるいは、瑞浪地域の花崗岩健岩部を、2mmのメッシュを通過するまで粉砕したものを使用した。
 粘土の粉末としては、クニゲル V1の粉末をクニミネ工業株式会社から購入し、これをそのまま使用した。
- 試験溶液の準備:蛍光染料の岩石等への吸着挙動に影響をあたえるパラメータとして、① イオン濃度、②溶液のpH、③有機物存在の有無、が考えられた。①イオン濃度として、海水 および1/10海水の2種類、②溶液pHとして5および9の2種類、③有機物として市販(和 光純薬)のフミン酸を10mg/Lになるように入れた場合と入れない場合の2種類、の合計8 種類の溶液を準備した。
- 岩石の秤量と溶液の添加:ガラス製容量 50mL の容器に岩石 2g を秤量した。粘土について は通常使われる掘削水と濃度を合わせるため、1.2g を秤量した。それぞれについて 8 本を準 備し、上記で準備した 8 種類の溶液 20mL をそれぞれ添加した。また、岩石や粘土を含まない ブランク試料をそれぞれの条件について準備した。
- ・ 蛍光染料の添加と振とう:蛍光染料のストック溶液を上記の溶液に添加し、試験開始時の 蛍光染料濃度が 5.0mg/L となるようにした。蛍光染料の添加直後と添加から 3 日後に pH を 8.0±0.1に調整した。容器は振盪機にかけ、7 日間緩やかに振盪した。この間光による影響 を受けないよう、サンプルが入った容器をアルミホイルで包んで遮光した。
- 固液の分離:ベントナイトをいれた試料については遠心分離で固液を分離後、上澄みのうち1.0mLを親水性 PTFEの孔径 0.45 µmのフィルタでろ過してフィルタをリンスした後、さらに1.0mLの上澄みをろ過した。
- ・ 希釈および分析:上記で得られたろ液のうち 0.25mL を抜き取り、あらかじめ 0.05M ホウ砂 溶液 4.75mL が入ったガラス容器に入れた。ホウ砂で 20 倍に希釈されたこの溶液をさらに必 要に応じて適切に希釈し、希釈した溶液における蛍光染料濃度を蛍光分光光度計で定量した。

試薬名	試薬量(g)
NaHCO₃	0.2
NaCl	27.0
Na₂SO₄	0.0
KCI	0.8
MgSO₄∙7H₂O	7.0
NaF	0.0
MgCl ₂ •6H ₂ O	5.0
CaCl₂	1.1

表 2.3.3-1 模擬海水を 1L 調製するために用いた試薬とその量

表 2.3.3-2 模擬海水における主要イオン濃度

イオン濃度(mg/L)							
Na K Ca Mg Cl SO ₄ HCO ₃						HCO ₃	
10676	420	397	1289	19206	2729	145	

(2) 試験結果

ウラニンおよびアミノGの吸着試験後の上澄み液中濃度と、吸着率を表 2.3.3-3 および 4 にまとめた。表における吸着率は以下の式で計算されたものである。

吸着率(%) =
$$\frac{[C]_{L} - [C]_{a}}{[C]_{BL}} \times 100$$

ここで、[C]_{BL}: pH や塩分濃度が対応するブランク濃度、[C]_a: 吸着試験後の上澄み溶液における 蛍光染料の濃度、であり、吸着率は容器壁への吸着量を除いた固体に吸着した量である。

岩石	溶液 pH	溶液 (イオン濃 度)	有機物	上澄みウラニン 濃度(μg/L)	吸着率 (%)
		横概海水	あり	178	96.2
	5	1天)规/母小	なし	222	95. 3
	ľ	1/10	あり	163	96. 5
泥岩		1/ 10 (2000) 49/0	なし	176	96. 3
//670		描	あり	4275	14.0
	٥	1天1元/4/小	なし	4296	13.6
	1	1/10横爆海水	あり	2938	40. 7
		1/ 10 (2.32) 4/3	なし	3228	34.9
		模擬海水	あり	4742	3. 2
	5		なし	4876	0.5
	ľ	1/10模擬海水	あり	4837	1. 3
花崗岩			なし	4792	2.2
	9	模擬海水	あり	4990	0.0
			なし	5053	0.0
		1/10模擬海水	あり	4996	0.0
			なし	4943	0.3
	л	模擬海水	あり	926	80.4
			なし	1078	77. 2
粘土	Ĭ	1/10模擬海水	あり	610	87.0
			なし	1714	63.4
		模擬海水 -	あり	4790	3. 7
	٥		なし	4857	2.4
	3	1/10模擬海水	あり	5733*	-
			なし	5575*	-

表 2.3.3-3 ウラニンの岩石への吸着試験結果

*ベントナイトが膨潤して水分が粘土層間に取り込まれたため濃度が増加したと考えられる

岩石	溶液	溶液	上澄みAG	吸着率
	рН	(イオン濃度)	濃度(μg/L)	(%)
	Б	模擬海水	4598	6.9
泥岩		1/10模擬海水	4704	6.0
	0	模擬海水	4747	5.7
	5	1/10模擬海水	4813	4. 1
花崗岩	5 9	模擬海水	4920	0.3
		1/10模擬海水	4649	7.1
		模擬海水	5060	0.0
		1/10模擬海水	4786	4.6
粘土	5	模擬海水	再試験	—
		1/10模擬海水	4994	0.2
	0	模擬海水	5104	0.0
	9	1/10模擬海水	5836*	-

表 2.3.3-4 アミノG(AG)を用いた吸着試験の結果

*ベントナイトが膨潤して水分が粘土層間に取り込まれたため濃度が増加したと考えられる

a. ウラニンの吸着挙動

添加したウラニンの濃度は 5000ppb であり、pH=9.0 の溶液では塩分濃度に関係なくブランク試験 においてはほぼこの値が観察されたのに対し、pH=5.0 の溶液ではブランク試験でも 5000ppb から有 意に濃度が低下していた。このため、pH=5.0 の溶液ではウラニンは一部ガラス容器壁にも吸着する ものと考えられる。また、ベントナイト試料の 1/10 海水では添加した溶液より顕著に濃度の高い ウラニン濃度が、試験後の上澄み液から検出された。これは、スメクタイトが塩分や蛍光染料を含 まない水を粘土層間に取り込んで膨潤し、結果的に溶液中のウラニン濃度が増加するためであると 考えられる。このため pH=9.0、1/10 海水溶液では吸着率の値を算出していない。また、ベントナ イト試料の pH=5.0、1/10 海水溶液ではこの現象を考慮していないため、上澄み中ウラニン溶液の 濃度を高く(吸着率を低く)評価している可能性がある。

トレーサー試験を実施する花崗岩に対しては、ウラニンの吸着はあまり有意ではなく多くても 2 ~3%程度である。試験実施箇所の地下水の pH が 8.0 程度であることを考えると、トレーサー試験 等においてウラニンの岩石への吸着はほとんど無視できる程度であると推察される。一方、粘土や 泥岩には条件によってかなりの蛍光染料が吸着していることがわかる。特に pH が 5.0 の場合、泥 岩では 96%、ベントナイトでは 80~90%程度のウラニンが固相へ吸着している可能性が示された。 このため、pH5.0 においては粘土鉱物への吸着が蛍光染料濃度減少の大きな要因となりうることが 分かる。一方、pH9.0 においては粘土鉱物に対するウラニンの吸着量は 3%程度まで低下するのに対 し、泥岩では 14%程度の吸着率が得られており、泥岩へのウラニンの吸着は粘土鉱物への吸着だけ では十分に説明できないことが示唆される。

フミン酸を添加した試料と添加しない試料とでは、吸着率の差は大きくないがフミン酸を添加し た場合の方が、わずかに吸着率が増大する傾向が観察された。このため、岩石が有機物を含むもの であった場合、この有機物に対してウラニンが吸着する可能性がある。

また、イオン濃度への依存性を見ると、花崗岩およびベントナイト試料への吸着挙動では模擬海水と 1/10 模擬海水の間ではあまり大きな差がみられない。一方、泥岩の pH9.0 溶液では、1/10 海水の方がウラニンが吸着しやすいことがわかる。

ウラニンにおいては吸着率の pH への依存性が顕著であり、泥岩・ベントナイトへの吸着が見ら れることから、ウラニンは岩石固相へ疎水的な吸着をしている可能性が高いと考えられる。ウラニ ンは pH が低下するとフェノール基から H+を乖離しなくなり、中性の有機物として存在することに なる。粘土や粘土鉱物・有機物を含む固相は疎水的な箇所がある可能性があるため、ここにウラニ ンが吸着する可能性がある。

ウラニンについては、pH5.0 での容器壁や岩石等への吸着が顕著であり、地下水や試験水の pH が 中性あるいは以下の溶液に対しては非吸着性のトレーサーとして使用することができない可能性

- 2-32 -

を考慮する必要がある。粘土鉱物への吸着挙動や、有機物を添加した場合の吸着挙動から、ウラニ ンの吸着には有機物や粘土鉱物が影響しており、これらを含む固相に疎水的に吸着している可能性 があると推察される。一方、アルカリ性の溶液中では、粘土や花崗岩への吸着はわずかであり、ほ ぼ非吸着性のトレーサーとして使うことができる。しかし、泥岩のように pH が高くても有意にウ ラニンを吸着する岩石が存在するため、トレーサー試験等でウラニンを使用する予定である場合に は、事前の検討が必須である。また、掘削水トレーサーとしてベントナイト等を混ぜた泥水に混入 させる場合にも、地下水や掘削水を調製するための pH の管理が極めて重要である。pH が中性以下 ではウラニンは粘土に吸着し、添加量と実際の液中の濃度が一致しないという状況が生じる可能性 が高い。また、海水のようにイオン濃度が高い溶液で掘削水を調製する場合でも掘削水のトレーサ ーとしてウラニンを使うことはできるが、逆にイオン濃度が低い水で掘削水を調製する場合には留 意が必要である。これは、掘削水に入れるベントナイト等の粘土が膨潤して水を吸収し、結果的に 計算した量よりも蛍光染料の濃度が高くなっている可能性があるためである。

b. アミノGの吸着挙動

AG については添加した 5000 µg/L に対して、全ての条件のブランク試験で 5000 µg/L に近い値が 得られた。このため、AG はウラニンほど容器壁への吸着が顕著ではないことがわかる。また、ベン トナイト試料の 1/10 海水では添加した溶液より顕著に濃度の高い AG 濃度が、試験後の上澄み液か ら検出され、ウラニンのときと同様にベントナイトの膨潤による水分量低下の影響があったものと 推察される。

AG はウラニンと異なり、pH5.0 でもベントナイトへの吸着がほぼ見られず、pH5~9 の領域におい て広く非吸着性のトレーサーとして使用できる可能性が示唆される。一方泥岩ではほぼ全ての条件 で 5~6%程度の吸着が見られており pH やイオン強度への依存性はほとんど見られない、吸着の他に 岩石に含まれる微生物等による分解などの影響がある可能性が考えられる。また、花崗岩において はイオン強度への依存性が明らかであり、pH5 および 9 ともにイオン強度が高い方が、吸着率が低 い傾向が見られる。泥岩や花崗岩に対する AG の吸着挙動については、これらの試験だけからはそ のメカニズムを議論することが難しく、さらに再現性の確認・検討が必要である。

以上のように AG は種々の条件下で粘土・泥岩・花崗岩への吸着が顕著ではないあるいは少なく、 ウラニンよりも広い条件下でほぼ非吸着性のトレーサーとして使用することが可能であると考え られる。特にベントナイトに対しては、pH5~9、イオン濃度 1/10~1 海水までの領域で吸着が顕著 ではないことから、掘削水調製時から濃度がずれる心配は少ない。しかし、ウラニンと同様にイオ ン濃度が低い水で掘削水を調製する場合には、ベントナイトの膨潤により水分量が低下することに よる効果を考慮する必要がある。

AG については、泥岩・花崗岩ともにわずかに吸着が見られたが、この数字が有意なものであるの
か、どのようなメカニズムで吸着が起きているのかをさらに検討する必要がある。

2.3.4 ポンプ部材に対する吸着挙動

ポンプ部材に対して蛍光染料が非吸着性を保てる条件について考察するため、ポンプの構成部材で ある SUS 粉末やフッ素ゴムに対する吸着試験を実施した。岩石への吸着試験の結果から、今回検討し た4つの蛍光染料のうち、ウラニンが最も吸着する可能性が高いと考えられたため、本試験はウラニ ンに対してのみ実施した。

(1) 試験手順

試験の手順は以下の通りである。

- ・ 蛍光染料ストック溶液の準備:ウラニン 0.1g を 100mL の純水に溶かし、これを 1000mg/L のウラニンストック溶液とした
- ・ 模擬海水の準備:模擬海水は2.3.3に示したのと同様の手法で調製した。
- ・ SUS およびフッ素ゴム粉末準備:吸着試験に用いる SUS 粉末は株式会社ニラコから購入した SUS304 粉末(100 メッシュ以下のもの)をそのまま用いた。フッ素ゴムはチューブで販売されているものを、液体窒素で冷却したものをタングステンのミルを用いて粉砕し、2mm 以下の大きさにしたものを用いた。
- 試験溶液の準備:本試験では、イオン強度が吸着挙動に与える影響と、pH が吸着挙動に与える影響を明らかにするため、①イオン強度:模擬海水または 1/10 模擬海水の 2 種類、②pH:5 または 9 の 2 種類、で試験を実施した。このため試験条件は SUS およびフッ素ゴム粉末についてそれぞれ 4 種類である。
- ・ 固相の秤量と溶液の添加:容量 50mL のフタ付きガラスビンに SUS あるいはフッ素ゴムの粉
 末 5.0g を秤量した。ここに、pH を予め所定の値に調整した、50mL の模擬海水あるいは 1/10
 模擬海水を加えた。
- ・ ウラニンの添加と pH の再調整:ウラニンストック溶液を 250 µL 加え、ストック溶液を添加した時刻を試験開始時刻とした。ウラニン添加後ビーカーにガラス電極を入れ、再度 pH が所定の値になるように調整した。pH 調整後のサンプルは遮光したうえ、振盪機で緩やかに振盪した。
- サンプリング:所定の時間が経過後、振盪機から取り出して静置し、固相が容器底部に沈むのを確認してから、上澄み液 0.1mLを採取した。採取した上澄み液は予め 4.9mLのホウ砂水溶液(0.05M)が入った容器に入れ、測定まで暗所で保管した。
- ・ 分析:上記のサンプルを必要に応じて適切に希釈し、蛍光光度計を用いて分析した。

(2) 試験結果

SUS およびフッ素ゴム粉末に対するウラニンの吸着試験では、ウラニン溶液と固相が接触した後 1~168 時間後の上澄み液のウラニン濃度について分析した。今回の試験では、全ての条件下で固相を入れないブランク試験と固相を入れた試験の上澄み溶液において有意な差が観察されなかった。このため、pH5~9、イオン強度 1/10 海水~海水、という溶液条件下でウラニンは SUS 粉末やフッ素ゴムに対して吸着する可能性は低いと考えられた。

2.3.5 蛍光染料の拡散挙動

蛍光染料が非吸着性のトレーサーとして扱われる場合、水や溶質と一緒に移動することが期待され ている。ここでは、他の非吸着性トレーサーと拡散挙動を比較し、他の非吸着性トレーサーと比べて 蛍光染料がどのような特性を持つのか、検討した。

拡散試験は、いわゆる Through Diffusion 法(Kross, 1987; 1988 東原ら, 2005)で実施した。拡 散試験には砂岩と泥岩を用い、砂岩については pH の依存性を明らかにした。試験手順は下記に示す通 りである。

- 岩石の固定:岩石は外径約5cm、厚み1cm(または0.5cm)に整形した。岩石を拡散セルに 固定するには、岩石をアクリル板に固定する必要がある。今回の試験では、岩石を穴のあい たアクリルセルに入れ、穴の隙間をエポキシ樹脂系の接着剤で埋めて、岩石をアクリル板に 固定した。また、岩石にゴムスリーブをかけて外から加圧する方法でセルにディスク状岩石 を固定する試験も実施した。この場合は、この過程を省略し、ディスク状岩石をそのまま脱 塩した。
- 岩石の脱塩:今回の試験では、C1 や Br もトレーサーとして用いたため、岩石間隙中に含まれる C1 や Br を予め取り除いておく必要がある。岩石を純水に浸漬すると、粘土鉱物の層間が拡がってスレーキングを起こす可能性があるため、イオン強度を間隙水のものと近い値に調整した硝酸ナトリウム溶液を準備し、これに岩石を浸漬することで、拡散によって岩石間隙水の C1 や Br を除去した。アクリル板に固定した岩石試料に対して、硝酸ナトリウム溶液への浸漬→上澄み液の交換を繰り返して、間隙水の C1 や Br が確実に取り除かれるようにした。

 拡散試験の開始:上記脱塩が終了した岩石を、拡散セルの中央に固定して拡散セルを組み 立てた。組み立てた両方の拡散セルに硝酸ナトリウム溶液を加え、セルに漏れがないことを 確認した。その後片方のセルを Cl・Br・重水を含む溶液と入れ替え、入れ替えた時間を拡散 試験の開始時間とした。また、溶液の入れ替え直後に片方のセルに蛍光染料のストック溶液 を加えて、蛍光染料の拡散試験をスタートさせた。

- サンプリング:所定の時間経過後、C1 や Br 等を入れていない方のセル(低濃度側セル) から、C1 および Br 濃度測定用のサンプルを採取した。蛍光染料分析用のサンプルは、予め 0.05M のホウ砂水溶液を入れたガラス容器に低濃度側セルからサンプルを採取して入れ、分 析まで暗所で保管した。重水濃度測定用サンプルは、セル内の溶液を調製したときに純水製 造装置から取り分けた水を使って10倍に希釈し、分析に供した。これは、δDの分析におい て塩濃度が高い場合にはシリンジの先が詰まるなどのトラブルが起きやすく、本試験では低 濃度側セルにおいてもイオン強度調整のために硝酸ナトリウムが加えてあり、塩濃度が高い ためである。
- 分析: C1 および Br は適切に希釈したあとイオンクロマトグラフィで分析した。Br 濃度が 硝酸濃度(バックグランドとして硝酸ナトリウム溶液を用いているため)に比べて低く、硝 酸イオンのピークの影響を受けて定量が上手くできない場合には、ICP-MS を用いて Br を分 析した。重水濃度については、「高濃度側セル」の初期溶液を、溶液調製時に取り分けた純 水を用いて希釈した検量線を作成し、WS-CRDS 方式水安定同位体比アナライザーを用いて分 析した。

図 2.3.5-1 および 2 には、砂岩における拡散試験結果のうち、pH6 および 9.5 で試験を実施したと きの、低濃度側セルにおける各トレーサー濃度の経時変化を示した。ここでは蛍光染料としたナフチ オン酸ナトリウム (NAP)を用いた。グラフからわかるように、高濃度側セルから低濃度側セルに溶出 するのは、重水が最も早く、ついで C1 と Br がほぼ同じタイミングで溶出しているのに対して、NAP は大きな遅れが生じていることがわかる。また、pH によってとくに NAP の挙動には大きな差異があり、 pH6 での試験では、50 日以上程度から低濃度側セルにおいても有意な濃度上昇が認められたが、pH9.5 の試験では 50 日が過ぎても濃度上昇は有意ではなかった。さらに、図 2.3.5-3 には、吸着性のトレー サーである Cs イオンと NAP 濃度の低濃度側セルでの経時変化を示した。NAP は基本的に非吸着性と考 えられるにもかかわらず、Cs よりもさらに溶出に時間遅れが生じていることが分かる。また、岩石は 溶液中の水素イオンを乖離・吸着することで表面の電荷が変化し、pH が高いほどマイナスにチャージ するものと考えられる。このため、pH9.5 の場合は pH6 の場合よりも岩石界面はさらにマイナスにチャージ するものと考えられる。このため、pH9.5 の場合は pH6 の場合よりも岩石界面はさらにマイナスにチャージ もくしていると考えられ、より非吸着性が担保されやすい条件であると考えられる。しかし、実際 には pH9.5 の場合では有意な NAP 濃度の上昇が見られていない。このため、低濃度側セルへの溶出に 時間遅れが生じたり、拡散係数が他の非吸着性トレーサーよりも小さくなる要因は、NAP イオンが他 のイオンよりも大きく岩石による陰イオンの排斥効果を強く受けるためであると考えられる。



図 2.3.5-1 拡散試験(砂岩、pH6)の低濃度側セルにおけるトレーサー濃度の経時変化 *蛍光染料としてナフチオン酸ナトリウムを用いた



図 2.3.5-2 拡散試験(砂岩、pH9.5)の低濃度側セルにおけるトレーサー濃度の経時変化 *蛍光染料としてナフチオン酸ナトリウムを用いた



図 2.3.5-3 拡散試験(砂岩、pH6)の低濃度側セルにおける Cs と NAP 濃度経時変化の比較

図2.3.5-4 および5 には蛍光染料としてウラニンを用いた場合の拡散試験の結果を示した。図に示 したのは、低濃度側セルにおける各トレーサー濃度の経時変化である。図からわかるように、NAP と 比較してもウラニンはさらに溶出速度が遅く、C1 や Br と同じグラフ上にプロットするとほとんど溶 出がないように見える。これは、ウラニンが NAP に比べて分子量が大きく、拡散で移動できる経路が より狭いためであると推察される。しかし、ウラニン濃度だけを取り出して観察すると、40 日程度か ら濃度が有意に上昇している様子が観察される(図2.3.5-6)。また、pH の依存性はほとんど観察さ れていない。NAP は官能基として S03 基を持ち、試験した pH では常にマイナスイオンとして存在でき ていると考えられるのに対して、ウラニンは OH 基であるため、pH 依存性は大きいと推定できる。こ のため、ウラニンの方がより pH 依存性を示す可能性が高いと考えられたが、試験結果ではウラニンの 方が pH 依存性が顕著ではなかった。この原因については、現在までの試験結果からは推定することが必要である。

砂岩の試験においてはいずれの pH においても、NAP・ウラニンは重水や C1・Br に比べて明らかに 拡散係数が小さく、拡散においては水やイオンよりもさらに遅い速度で移動する可能性が高いことが わかった。



図 2.3.5-4 拡散試験(砂岩、pH6)の低濃度側セルにおけるトレーサー濃度の経時変化 *蛍光染料としてウラニンを用いた



図 2.3.5-5 拡散試験(砂岩、pH9.5)の低濃度側セルにおけるトレーサー濃度の経時変化 *蛍光染料としてウラニンを用いた



図 2.3.5-6 低濃度側セルにおけるウラニン濃度の経時変化

図2.3.5-7には、泥岩を用いた拡散試験の結果を示している。図に示した結果では、蛍光染料とし て NAP を用いた。図から分かるように、他の非吸着性トレーサーと比較して、NAP の濃度上昇は顕著 ではなく、泥岩においても拡散係数が他トレーサーより小さいことがわかる。NAP だけの濃度変化を 抽出したものを図 2.3.5-8 に示した。図には濃度変化を試験した 2 つのセルにおける NAP 濃度の経時 変化を示した。図に示したように、NAP の濃度は時間に対して直線的に上昇したものの、その後横ば いまたは減少するような傾向が見られた。得られた直線部から算出された拡散係数は、重水・C1・Br の拡散係数と比較して 1~2 桁低い数値を示した。NAP 濃度の経時変化が横ばいになる理由として、遅 い kinetics の吸着があり、拡散した後で岩石に吸着されたことや、微生物活動等により一度拡散した NAP が分解された可能性も考えられる。試験の前半部分では NAP は非吸着性のトレーサーとして働い たものの、後半はなにかしらの原因でそうではなくなっていることがわかる。一方ウラニンについて は、低濃度側セルから有意な濃度を全く検出することができなかった。ウラニンが NAP よりも破過が 遅くなることは、砂岩でも確認されているうえ、前述の吸着試験でもウラニンの吸着は NAP よりも大 きいことが分かっている。ウラニンは拡散のプロセスで岩石に強固に吸着されたか、前述のように微 生物等の活動で分解された可能性も考えられる。以上のように泥岩では、砂岩以上に重水や Cl・Br イオンに対して蛍光染料の拡散挙動は大きく異なっており、拡散プロセスにおいて蛍光染料は水や溶 存イオンの定量的なトレーサーにはなりにくいことがわかった。



図 2.3.5-7 泥岩での拡散試験における低濃度側セルのウラニン濃度の経時変化 *蛍光染料として NAP を用いた



図 2.3.5-8 泥岩での拡散試験における低濃度側セルの NAP 濃度の経時変化

⁽²つのセルにおける結果を示している)

以上のことから、非吸着性と考えられているトレーサーにおいて、拡散速度は重水>Cl・Brイオン >>蛍光染料、であることが分かった。蛍光染料が地下水調査に用いられる用途の一つとして、「掘 削水混入評価」が挙げられる。低透水性の岩盤においては、地下水が任意の深度で取得できないため、 ボーリング掘削で得られた岩石コアから間隙水を抽出して地下水の深度プロファイルを明らかにする ことがある。このようなケースでは、掘削水に一定量の蛍光染料を添加し、抽出したコア間隙水にお ける蛍光染料濃度を評価して掘削水の混入割合を評価する。上記の結果によると、岩石コアに割れ目 があり割れ目に沿って掘削水が浸入することを評価する場合には蛍光染料による掘削水混入評価は有 効であると考えられる。一方で、コアが長時間掘削水に浸漬し拡散によって間隙水が汚染される場合 には、抽出した間隙水に蛍光染料が含まれていなかったとしても、Cl・Br等のイオン濃度や水の安定 同位体比は影響を受けている可能性が否定できないことになる。しかし、蛍光染料の拡散係数が他の 非吸着性トレーサーと比べて小さいことを理解してこの性質を利用することができれば、この性質は 有用であると考えることができる。例えば割れ目からの浸入による掘削水汚染のみを評価したり、他 トレーサーとの比較によって場における拡散影響の有無を議論できる可能性もある。

2.3.6 まとめ

2.3 で実施した試験結果から、トレーサー試験や掘削水混入評価に蛍光染料を利用する場合には、 以下のような点に留意した上で利用方法を考える必要がある。

(1) 熱耐性

今回試験を実施した条件(60℃以下、1週間以内)では、蛍光染料において顕著な濃度低下は観察されなかった。このため、トレーサー試験等でポンプ等を利用する場合や、温水の影響が考えられる場合でも、熱による分解の影響はほぼ無視できると考えて良い。

(2) 蛍光染料の取り扱い

既往の研究でも指摘されているように、蛍光染料は日光の照射で容易に分解する。このため、試験・保管等においても日光への曝露は極力避ける必要がある。試験を実施した全ての蛍光染料について、日光での分解が確認されたが、エオシンは特に日光に弱く、使用には留意が必要である。一方で、室内での蛍光灯への曝露試験では、NAP および AG では有意な濃度変化が確認されず、ウラニン・エオシンでは濃度が微減(1週間で5%程度)することが観察された。直射日光を避けた室内でも遮光して保管することが望ましいと考えられるが、数時間程度の操作を蛍光灯の下で実施することについて神経質になる必要はない。

(3) ポンプ部材への吸着

SUS およびテフロンゴム粉末への吸着試験を実施したが、ウラニンは pH5~9、イオン濃度 1/10 海水~海水程度の条件で有意に吸着しないことがわかった。このため、蛍光染料の選定や試験条件

- 2-42 -

の選定において、ポンプ部材への吸着は考えなくて良い。

(4) 岩石への吸着

花崗岩への吸着については、pH5~9、イオン濃度 1/10 海水~海水程度の条件下で、ウラニンで最 大 5%程度、アミノ G 酸ではほとんど有意な吸着が観察されなかった。このため、花崗岩を対象とし た場合、ウラニン・アミノ G (また、その結果からエオシンや NAP) はほとんどの地下水において 非吸着性のトレーサーとして使用できると考えられる。一方、泥岩においては、pH5 の地下水では とくにウラニンの吸着が顕著であり、ほとんどのウラニンが液相から消失した。一方で NAP の吸着 試験では、全ての pH 領域で吸着は 5%以下程度であり、NAP は泥岩に対してもある程度非吸着性の トレーサーとして利用することが可能であると考えられる。しかし、拡散試験では経過日数ととも に NAP 濃度が減少していく様子が観察され、微生物活動等により液相の NAP が減少している可能性 も考えられた。

(5) ベントナイトへの吸着

ウラニンは pH5.0の溶液中でベントナイトへの吸着が顕著であった。一方で、アミノG はベント ナイトへの吸着がほとんど観察されなかった。このため、掘削水の泥剤に蛍光染料を入れて、掘削 水の地下水への混合割合を評価する場合には、ウラニンを使用すると泥剤を作成した時点で投入量 と実際の蛍光染料濃度に差が生じてしまう可能性が高い。

(6) 拡散挙動

ウラニンや NAP を用いて拡散試験を実施したところ、他の非吸着性トレーサーに対して 1~2 桁 程度低い拡散係数を示した。このため、これらのトレーサーはマトリクス拡散による影響を受けに くいという利点がある一方で、掘削水がコア等にどの程度浸入したかという評価には使いにくいこ とがわかった。 参考文献

- 日本原子力学会(2006):収着分配係数の測定方法-深地層処分のバリア材を対象とした測定方法の基本手順、日本原子力学会深地層分配係数分科会
- 柏谷公希,中田弘太郎,長谷川琢磨(2010): 簡便で高精度な地下水の蛍光染料濃度測定法の提案-ボーリング調査における信頼性の高い地化学データ取得のために-.電力中央研究所報告書: N09026.
- 東原知広,中田弘太郎,長谷川琢磨,後藤和幸(2005):地下水年代測定評価技術の開発(その3), 一岩石柱における溶存 He の拡散係数決定法の提案と陰イオンを用いた拡散係数の間接的評価法の 適用性一.電力中央研究所報告書:N05067.
- Kross, B. M., and Schaefer, R. G., (1987). Experimental measurements of diffusion parameters of light hydrocarbons in water-saturated sedimentary rock-I. A new experimental procedure, Organic Geochemistry, 11, 193-199.
- Kross, B. M., and Schaefer, R. G., (1988). Experimental measurements of diffusion parameters of light hydrocarbons in water-saturated sedimentary rock-II. Results and geochemical significance, Organic Geochemistry, 12, 91-108.
- Magal, E., Weisbrod, N., Yakirevich, A., Yechieli, Y., (2008). The use of fluorescent dyes as tracers in highly saline groundwater. Journal of Hydrology 358, 124-133.

3. ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発

3.1 はじめに

岩盤中の割れ目の間隙幅は様々な方法で推定がなされているが、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、孔壁の割れ目幅は岩盤内部より大きくなり、実際の間隙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。このほか方法を含めて間隙 幅の推定方法にはそれぞれ不確実性を有しており、決定的な手段は存在しない。このため、様々な手 法を組み合わせて相補的に割れ目の間隙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用いる手法は、割れ目間隙中に存在するラドン濃度を計測する手法で ある。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、ボアホール TV と異なり、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間隙幅の 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。

3.2 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みと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。

岩盤中のラジウムから発生し、反跳するラドンの移動距離は小さく、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、岩石内で発生して割れ目の表面から地下水中に溶解したものと考えることができる。割れ目を平行平板と仮定し、割れ目表面から供給されるラドンの量と割れ目の面積には図 3.2.-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

- 3-1 -

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、間隙幅(w)を評価しようとするものである(図 3.2-1)。



F:割れ目表面におけるラドンフラックス

図 3.2-1 ラドンによる割れ目幅計測の原理

3.3 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、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間隙幅や、 その後に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 した割れ目の間隙と比較し、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 性を評価していく必要がある。我が国における溶存地下水のラドン濃度は変化に富み、胚胎する地質 によってその濃度が異なる。特に堆積岩地域の地下水のラドン濃度の分布範囲は3オーダーにも及ぶ ために、割れ目間隙幅の推定手法を広く適用するためには、堆積岩への適用性を検討しておく必要が ある。このため、昨年度は、砂岩や頁岩などの堆積岩への適用性を検討し、堆積岩からのラドンの発 生は、花崗岩に比較して岩石内部からのラドンの発生がより寄与していることが想定された。このた め、今年度は引き続き堆積岩からのラドンの発生量を検討することする。 3.4 ラドンによる割れ目間隙幅の推定手法の堆積岩への適用性検討

3.4.1 岩石の物理化学特性

ラドンフラックスの測定のため、使用した岩石試料は、多胡産の砂岩、藤枝産の砂岩、幌延産の泥 岩である。多胡産の砂岩は新第三紀前期中新世の中粒〜粗粒砂岩(以降、多胡砂岩と呼称)であり錆 (鉄分の沈殿)が少ない均質なものを試料とした。藤枝産の砂岩(以降、藤枝砂岩と呼称)は新第三 紀前期中新世の細粒〜中粒砂岩で膠結が良く、緻密で均質なものを使用した。幌延産の泥岩は新第三 紀前期中新世の珪質泥岩(以降、幌延泥岩と呼称)であり、電中研が実施した HCD-3 孔ボーリングの コアを使用した。また、堆積岩試料との比較ならびに原位置のラドン濃度による割れ目幅の予察的検 討のために、併せて瑞浪超深層研究所の深度 300m ボーリング横坑において掘削したボーリングコアの 分析も実施した。使用したボーリングコア 12MI30 孔、12MI31 孔、13MI36 孔、13MI37 孔の中粒花崗岩 (以降、瑞浪花崗岩と呼称)である。

3.4.1.1 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)によって分析した。 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 た。詳細は以下のとおりである。

(1) 蛍光 X 線分析:分析コード

分析元素: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, Cr₂O₃, TiO₂, MnO, P₂O₅, SrO, BaO, SO₃, LOI 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 成した。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した。

- (2) 誘導結合プラズマ質量分析法
- a. 分析コード MS-MS61

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

分析方法:粉末状にした試料について、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、酸溶液試料を作成した。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。

b. 分析コード MS-MS61

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

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、ガラス試料を作成した。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した。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。

(3) 分析試料

分析試料の一覧を表 3.4.1-1 に示す。多胡砂岩、藤枝砂岩は色や粒度に違いがなく、割れ目も 存在しない均質な岩石を試料としている。幌延泥岩も色、硬度の差がなく割れ目も存在しないも のを選定した。瑞浪花崗岩は、6試料のうち、②、⑬、⑰の試料は割れ目や脈がない新鮮な花崗 岩である。一方、④、⑩および⑲は、試料の端部が充填鉱物のある割れ目であり、岩石内部(マ トリックス)は造岩鉱物の組織は残しているが、全体に弱い変質を被っている。変質の特徴は備 考欄に示した。

試料名(コア試料は孔名_深度)	岩石名	備考
多胡砂岩①	中粒~粗粒砂岩	
多胡砂岩②	中粒~粗粒砂岩	
藤枝砂岩①	細粒~中粒砂岩	
幌延泥岩②(HCD-3 452.83m-453.00m)	珪質泥岩	稚内層※
幌延泥岩④(HCD-3 572.40m-572.55m)	珪質泥岩	稚内層※
幌延泥岩⑥(HCD-3 670.66m-671.00m)	珪質泥岩	稚内層※
瑞浪花崗岩②(12MI30 12.55m-12.68m)	中粒花崗岩	
瑞浪花崗岩④(12MI30 21.67m-21.75m)	中粒花崗岩	弱変質(緑泥石化・黄鉄鉱含む)
瑞浪花崗岩⑩(13MI36 8.30m-8.40m)	中粒花崗岩	弱変質(緑泥石・スメクタイト含む)
瑞浪花崗岩⑬(13MI36 11.00m-11.19m)	中粒花崗岩	
瑞浪花崗岩①(13MI37 13.90m-14.00m)	中粒花崗岩	
瑞浪花崗岩⑲(13MI37 24.40m-24.55m)	中粒花崗岩	弱変質(緑泥石化・黄鉄鉱含む)

表 3.4.1-1 分析試料一覧

※木方ほか (2009)

試験岩石の蛍光 X 線分析による主要構成元素を表 3.4.1-2 に示す。各試料ともに主成分は、ケ イ素を最大の主要元素として、ほかにアルミ、カルシウム、カリウムなどで構成される。幌延泥 岩は多胡砂岩と同程度に珪素の割合が高く、珪質であることが影響している。藤枝砂岩はカルシ ウム、カリウム、マグネシウムが幌延泥岩並みに多く、マトリックスに泥質分が多いことが推定 される。この泥質分の多さは、後述するように砂岩としては間隙率が低い値を示すことと関係す ると考えられる。

瑞浪花崗岩の CaO-Na₂O-K₂O 成分の三角ダイアグラムを図 3.4.1-1 に示す。図中には、平成 23 年度に瑞浪超深地層研究所の深度 300m 研究アクセス坑道のニッチより掘削したボーリング (10MI22、24、25)の分析結果と、湯口ほか(2010)による土岐花崗岩体の分析結果を示した。 また、併せて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)も示した。瑞浪花崗 岩の分析結果によれば、ボーリングコアの未変質の試料(瑞浪花崗岩②、13、10)は、JG-2の苗 木花崗岩に近く、また、湯口ほか(2010)の土岐花崗岩体の分布範囲内にある。瑞浪超深地層研 究所の10MI22、24、25 孔のボーリングコアとの比較では、大きな違いはないが、変質した試料は Ca0、Fe₂0₃、Mn0、SO₃が富化する一方、SiO₂、Al₂O₃、K₂O が失われており、緑泥石化などの影響と 考えられる。

= balat fe	SiO.	AL ₀	Fe ₂ 0	Ca0	MgO	Na ₂ 0	K.0	Cr.O.	Ti0.	Mn0	P _a O _r	Sr0	Ba0	S0,	Total	LOI
試料名	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
多胡 砂岩①	73.3	15.40	3.64	0. 06	0.12	0.11	1. 24	<0. 01	0. 49	0. 08	0. 07	0. 04	0.04	0. 02	100. 15	5. 47
多胡 砂岩②	74.4	15. 20	2. 71	0. 05	0.09	0.10	1.09	<0.01	0. 41	0.06	0. 06	0. 03	0.03	0. 03	99.67	5. 48
藤枝 砂岩①	81.7	8. 76	1. 78	0. 58	0.54	2.11	2. 11	0. 01	0. 25	0. 02	0. 05	0. 01	0.06	0. 28	99.64	1. 37
幌延 泥岩②	81.7	6. 68	2. 24	0. 26	0.65	1. 28	1.14	0. 01	0. 32	0. 01	0. 04	0. 01	0.04	1.66	100.8	4. 71
幌延 泥岩④	74. 3	8. 21	3. 35	0. 27	0.90	1.40	1. 41	0. 01	0. 38	0. 02	0. 05	0. 01	0.04	3. 02	100.55	7. 1
幌延 泥岩⑥	76.3	8. 41	3. 17	0. 28	0.93	1.47	1.46	0. 01	0. 38	0. 02	0. 05	0. 01	0.04	2.64	100.65	5.45
瑞浪花 崗岩②	73.7	13.65	2. 25	1.40	0.30	3.68	4.5	0. 01	0.19	0. 08	0. 05	0. 01	0.06	0. 01	100.05	0. 11
瑞浪花 崗岩④	64. 8	13. 15	4. 83	4. 33	0.34	3. 58	3. 91	<0.01	0. 18	0.14	0. 05	0. 01	0. 05	0. 48	99.99	4. 08
瑞浪花 崗岩10	73.4	13.0	2. 48	1. 40	0. 31	3. 35	4.64	<0. 01	0. 18	0. 08	0. 05	0. 01	0.06	0. 42	99. 72	0. 29
瑞浪花 崗岩13	73. 7	13.50	2. 32	1.44	0. 32	3. 58	4.45	<0.01	0. 19	0. 07	0. 05	0. 01	0.06	0. 06	99.96	0. 18
瑞浪花 崗岩①	73.9	13.40	2. 08	1. 33	0. 24	3.06	4.65	<0. 01	0.16	0. 07	0. 04	0. 02	0.06	0. 01	99.83	0. 24
瑞浪花 崗岩19	71.4	12.40	3. 45	2. 72	0. 29	3. 25	4. 26	<0.01	0.19	0. 09	0. 05	0. 01	0.05	2. 50	102.4	1.69

表 3.4.1-2 蛍光 X線による試験岩石の主要元素



図 3.4.1-1 瑞浪花崗岩の Ca0-Na20-K20 成分の三角ダイアグラム

図中の点線は湯口ほか(2010)による土岐花崗岩体の分布範囲内を示す。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)は産業技術総合研究所で公開している地球化学標準物質である。

誘導結合プラズマ発光分析法による微量成分分析結果を表 3.4.1-3 (ME-MS61) と表 3.4.1-4
(ME-MS81) にそれぞれ示す。多胡砂岩、藤枝砂岩、幌延泥岩の微量元素の分析結果をコンドライ
ト規格化した希土類元素 14 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 3.4.1-2) 。規格化には、Taylor & McLennan (1985) のコンドライ

ト値を採用した。この図によれば幌延泥岩試料と藤枝砂岩にはEuの負異常が認められるが、多胡砂岩には明瞭には認められない。なお、希土類のパターンを見る限りは、藤枝砂岩はどちらかというと、幌延泥岩に近い組成を持っており、泥質の成分を多く含んでいる可能性がある。

試料名	Ag	A I mag	As mag	Ba ppm	Be	Bi ppm	Ca ppm	Cd mag	Ce ppm	Co mag	Cr ppm	Cs ppm	Cu ppm	Fe ppm	Ga ppm	Ge ppm
多胡砂岩①	0.05	7.65	8.8	280	0. 92	0.13	0.04	0.09	55.7	4.9	17	7.7	4.9	2.49	19.75	0.15
<u>多</u> 胡 砂岩(2)	0. 05	7. 58	8.7	240	0.9	0.12	0. 04	0. 09	54.6	4.4	17	6.84	4. 5	1.87	17.85	0.13
藤枝 砂岩①	0.1	4. 68	4.5	450	1.04	0.07	0.45	0. 04	32. 8	4.6	34	2.59	8. 2	1. 28	9. 28	0.12
幌延 泥岩(2)	0. 22	3. 45	6.1	290	0.91	0. 13	0. 2	0. 27	25. 1	3.6	48	4. 05	20. 3	1.52	7.88	0.11
幌延 泥岩④	0.34	4. 18	8.9	290	1. 02	0. 2	0. 2	0. 44	30. 1	4.6	55	4. 78	22. 3	2. 23	9.8	0. 14
幌延 泥岩⑥	0.36	4. 27	9	280	1. 11	0.19	0. 2	0. 41	31.8	4.4	59	4.96	22. 7	2. 1	9.76	0.12
瑞浪花 崗岩②	0. 02	6.96	1.2	450	3. 31	0. 07	1. 02	0. 02	58.3	1.5	5	7.92	3.1	1.59	16.95	0. 23
瑞浪花 崗岩④	0.11	5. 51	12. 4	340	1. 88	6. 32	3. 09	<0.02	42.8	3.8	4	4. 28	120. 5	3. 24	15.65	0. 26
瑞浪花 崗岩10	0.12	6. 47	2. 2	410	2. 71	0. 52	1.01	0.04	52	1.6	7	7.61	2.9	1.67	15.6	0. 27
瑞浪花 崗岩13	0. 07	6. 84	1. 2	440	2.99	0. 24	1.05	<0. 02	65.4	1.5	9	7.5	1.8	1.58	16.95	0. 29
瑞浪花 崗岩①	0. 03	6. 64	1.6	450	3. 26	0.16	0. 94	<0. 02	66.3	1.2	8	8. 22	1.8	1.39	16.35	0. 33
瑞浪花 	0. 01	5. 81	5	350	2. 57	0. 19	1.94	<0. 02	42.6	1.4	6	6. 78	6.9	2. 31	15. 15	0. 26
試料名	Hf ppm	In ppm	K %	La ppm	Li ppm	Mg %	Mn ppm	Mo ppm	Na %	Nb ppm	Ni ppm	P ppm	Pb ppm	Rb ppm	R ppm	S ppm
多胡 砂岩①	0.8	0. 051	0.99	28.6	113.5	0.06	591	1. 28	0.06	10.1	5. 2	300	16.6	34. 3	0. 002	0. 01
多胡 砂岩②	0. 7	0. 045	0.88	27.6	120.5	0. 05	443	0. 79	0. 05	8.5	5.6	250	18. 0	29.5	0.004	0. 01
藤枝 砂岩①	1.4	0. 022	1.79	15.9	32. 3	0. 31	161	0. 57	1. 54	4.6	12. 7	190	11. 3	69.6	<0. 002	0. 12
幌延 泥岩②	1. 2	0. 028	0.94	11.8	19.4	0. 36	104	4. 49	0. 89	4.5	21.4	160	5.8	48.9	0. 007	0. 67
幌延 泥岩④	1.5	0. 038	1.11	14. 2	26. 6	0. 48	147	6. 71	0. 94	5.3	30. 2	200	8. 5	58. 1	0. 01	1. 16
幌延 <u>泥岩⑥</u>	1.6	0. 038	1.15	15. 1	27. 1	0. 5	149	4. 79	0.99	5.3	27.8	210	9.7	59.8	0. 008	1.00
瑞浪花 崗岩②	1.9	0. 039	3.81	28. 9	53.8	0.16	579	1.79	2.76	14	0.9	200	29. 2	230	<0. 002	0. 01
瑞浪花 崗岩④	1.7	0. 035	3.13	18. 1	51.5	0. 15	1050	0.89	2.57	12	0.9	160	14. 1	181	<0. 002	0.19
場浪花 尚岩⑪	2	0. 041	3.66	25. 8	44. 4	0.16	563	0.96	2. 38	13.5	1.3	190	39. 0	221	<0. 002	0. 17
場混化 尚岩 <u>(13</u>)	1.8	0. 042	3.68	32. 3	43. 8	0.16	555	1.5	2.61	13.6	1.5	190	32. 0	220	<0. 002	0. 02
描混化 崗岩①	2. 2	0. 038	3. 72	32. 4	44. 1	0. 12	493	1.2	2. 57	13. 2	0.8	150	29. 3	235	<0. 002	0. 01
墙浪花 崗岩19	1.9	0. 035	3.42	18.7	37.9	0.13	637 T	1.53	2.33	13.7	1	180	22.8	197. 5	<0.002	0.99
試料名	Sb ppm	SC ppm	Se ppm	Sn ppm	Sr ppm	la ppm	le ppm	Ih ppm	%	ppm	U ppm	v ppm	W ppm	ř ppm	Zn ppm	Zr ppm
多胡 砂岩①	19.5	9.8	1	1.7	317	0. 68	<0. 05	6.3	0. 275	0. 33	1. 2	33	9.9	16	67	25.9
多胡 砂岩②	19.0 5	8	2	1.5	263	0.6	<0.05	6.7	0. 239	0. 27	0.9	29	9.7	10.8	56	21.6
藤枝 砂岩①	0. 41	4.6	1	1	113.5	0. 35	<0.05	5.8	0. 146	0. 41	1. 2	32	0.8	9.6	37	44.4
幌延 泥岩②	0. 48	6.1	2	1	59.7	0. 32	<0.05	4.7	0. 18	0. 24	2. 9	53	0. 7	8. 3	57	42. 2
幌延 泥岩④	0.51	7.6	2	1.2	66	0.39	<0.05	6	0. 212	0. 32	3.4	62	0.8	10.3	72	48.5
· 幌延 泥岩⑥	0. 43	7.7	2	1.2	70	0.37	<0.05	5.9	0. 218	0.3	2.9	63	0.9	10.5	70	50.6
場 場 場 岩 ② 二	0. 08	4	2	4.3	128	1.49	<0.05	24.3	0. 108	1.11	5.1	10	0.6	35.4	45	47.7
場浪花 崗岩④	0.19	3	1	6.6	78	1.27	<0.05	16.5	0. 091	1.16	8.9	8	1.7	23.5	47	43.8
場 場 場 治 他 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一	0.11	3.8	1	4	114.5	1.21	<0.05	21.2	0. 101	1.12	5.4	9	1.2	30.6	47	51.8
場 場 場 に 場 に 場 に し に し <br< th=""><th>0. 1</th><th>4. 1</th><th>1</th><th>4.3</th><th>130.5</th><th>1.39</th><th><0.05</th><th>25.6</th><th>0. 105</th><th>1.1</th><th>6.9</th><th>10</th><th>0.4</th><th>31.6</th><th>41</th><th>43.4</th></br<>	0. 1	4. 1	1	4.3	130.5	1.39	<0.05	25.6	0. 105	1.1	6.9	10	0.4	31.6	41	43.4
場 場 場 治 団 一	0. 08	4.5	1	3.9	113.5	1.52	<0.05	23.8	0. 088	1.08	5.4	8	0.6	36.6	34	54.6
場浪花 	0.11	3.4	1	3.9	104.5	1.11	<0.05	19.8	0. 101	1.32	5.2	9	1.1	27.5	33	60.7

表 3.4.1-3 微量元素分析 (ME-MS61)

試料名	Ba	Ce	Cr	Cs	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Hf	Но	La	Lu	Nb	Nd	Pr
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
多胡 砂岩①	277	56.7	30	7.19	3. 55	2.15	1.1	20. 3	3.81	5	0.75	30.4	0.3	10. 7	23. 1	6.4
多胡 砂岩②	237	55.5	20	6.39	2. 73	1.56	0.96	17.9	3. 22	5.1	0.55	28.3	0. 22	8.8	21.6	6
藤枝 砂岩①	379	27. 2	40	1.95	1.71	1.15	0. 41	8. 2	1.72	4.4	0.38	13.3	0.18	4. 1	10.8	2. 98
幌延 泥岩②	280	23.4	50	3. 71	1.69	1.01	0.44	8.4	1.85	2	0.36	11.2	0.16	4. 6	10. 1	2. 7
幌延 泥岩④	295	29.4	60	4.62	2. 08	1.24	0.5	10. 8	2. 25	2.4	0.43	14	0. 21	5.7	12. 2	3.36
幌延 泥岩⑥	278	31.4	60	4. 7	2. 08	1.31	0. 54	10. 5	2.35	2.4	0. 45	15	0.19	5.8	13.5	3.6
瑞浪花 崗岩2	417	50. 2	10	7.64	5.37	4	0. 56	16. 7	5	4. 8	1.3	24. 7	0. 72	13	20. 3	5.65
瑞浪花 崗岩④	341	64. 9	10	4.4	6.67	4.86	0.61	16.5	6.38	4. 2	1. 58	32.3	0. 82	12.4	26.9	7.27
瑞浪花 崗岩10	403	50. 2	10	7.65	4.69	3.68	0. 53	16. 1	4. 58	4.4	1. 17	25.4	0.64	12.8	19.6	5.43
瑞浪花 崗岩13	425	57.8	10	7.4	5.35	3.8	0. 61	16. 5	5. 18	5	1. 27	28.9	0. 68	12. 7	22. 7	6. 41
瑞浪花 崗岩①	447	65.3	10	8. 25	5.93	4. 08	0. 59	16.3	5. 52	5.7	1.36	32.5	0. 7	12.3	26. 3	7. 2
瑞浪花 崗岩19	345	52	10	6.82	5.04	3.67	0. 53	15. 2	4.76	4.9	1. 18	25.8	0.6	13	20. 7	5. 72
計判夕	Rb	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Th	Tm	U	٧	W	Y	Yb	Zr		
DL 1710	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm		
多胡 砂岩①	34.4	4. 62	2	338	0.6	0.6	6. 05	0. 29	1. 52	35	10	19.2	2.1	182		
多胡 砂岩②	29. 2	4. 09	2	266	0.5	0. 47	6.06	0. 22	1.19	31	10	14	1. 31	181		
藤枝 砂岩①	58.3	2. 13	1	95.8	0.2	0. 28	4. 68	0. 18	1.26	28	1	9.6	1.08	161		
幌延 泥岩②	47.1	2. 07	1	58.3	0. 2	0. 26	4. 43	0.16	2.86	53	1	9.3	0.99	66		
幌延 泥岩④	58.8	2. 56	1	66. 9	0.3	0.34	5.79	0.18	3.34	66	1	11.5	1.3	77		
幌延 泥岩⑥	60.8	2. 82	1	70. 5	0.3	0.36	5.67	0.19	3	69	1	12	1. 28	78		
瑞浪花 崗岩2	1.9	0. 039	3. 81	28. 9	53.8	0.16	579	1.79	2.76	14	0.9	200	29. 2	230		
瑞浪花 崗岩④	1.7	0. 035	3. 13	18. 1	51.5	0. 15	1050	0.89	2. 57	12	0.9	160	14. 1	181		
瑞浪花 崗岩10	2	0. 041	3.66	25. 8	44. 4	0.16	563	0.96	2. 38	13. 5	1.3	190	39.0	221		
瑞浪花	10	0 042	3 68	32.3	43.8	0.16	555	1.5	2.61	13.6	1.5	190	32.0	220		
岡石心	1.0	0.012	0.00													
高石(b) 瑞浪花 崗岩(f)	2.2	0. 038	3. 72	32. 4	44. 1	0. 12	493	1.2	2.57	13. 2	0.8	150	29. 3	235		

表 3.4.1-4 微量元素分析 (ME-MS81)



図 3.4.1-2 多胡砂岩、藤枝砂岩、幌延泥岩の希土類パターン(ME-MS81の分析値を使用)

瑞浪花崗岩の未変質の試料についても希土類 14 元素のパターン図を作成した。また、標準試料と して花崗岩類の標準試料 JG-1、JG-2、JG-3 と平成 23 年度に瑞浪超深地層研究所の深度 300m 研究ア クセス坑道のニッチより掘削したボーリング (10MI22、24、25)のパターンも併せて示した (図 3.4.1-3)。平成 23 年度ならびに今回分析した瑞浪花崗岩は、日本の花崗岩の特徴である軽希土類 (左側)に富み、Eu 負異常で特徴付けられる。

なお、ME-MS61 と ME-MS81 では花崗岩や砂岩の Zr や Hf が ME-MS81 において高い値を示している。 これは、ME-MS81 のアルカリ溶融では、高温融解後にガラス化して酸溶融するために、ジルコンなど の酸に難溶融性の鉱物も溶けているが、ME-MS61 では粉末化した試料をそのまま酸溶融するために十 分溶解していないことが考えられる。ME-MS61 と ME-MS81 については岩石の特徴により長所・短所が あるが、今回の花崗岩試料の Zr や Hf については ME-MS81 の値を採用すべきと考える。



図 3.4.1-3 瑞浪花崗岩の希土類パターン(ME-MS81の分析値を使用) (Fおよび A シリーズは平成 23 年度に本事業で分析したコア(10MI22、24、25)の分析結果)

3.4.1.2 鉱物分析

試料とした岩石の構成鉱物を明らかとするために X 線回折(XRD)分析を実施した。多胡砂岩、藤 沢砂岩や幌延泥岩の試料については、ラドンの発生と関連する 2 次鉱物生成などの間隙構造への影響 について検討するために実施する。また、瑞浪花崗岩については、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行った。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化所もあわせて分析した。X 線回折分析の対象とした試料を表 3.4.1-5 に示 す。

試料名(コア試料は孔名_深度)	岩石名	分析部位	備考
多胡砂岩①	中粒~粗粒砂岩	全体	
多胡砂岩②	中粒~粗粒砂岩	全体	
藤枝砂岩①	細粒~中粒砂岩	全体	
幌延泥岩③(HCD-3 463.05m-463.56m)	珪質泥岩	全体	
幌延泥岩④(HCD-3 572.40m-572.55m)	珪質泥岩	全体	
幌延泥岩⑥(HCD-3 670.66m-671.00m)	珪質泥岩	全体	
瑞浪花崗岩①(12MI30 6.68m-6.78m)	中粒花崗岩	母岩	2条の割れ目に白色鉱物が充
		(優白色)	填。間の母岩が変質(白化)。
瑞浪花崗岩⑤ (12MI30 22.54m-22.77m)	中粒花崗岩	充填物	暗緑色粘土鉱物充填。割れ目
		(暗緑色)	沿い母岩変質(白化)。
瑞浪花崗岩⑥(12MI31 8.31m-8.40 m)	中粒花崗岩	母岩	優白~淡緑粘土鉱物充填。
		(優白~淡緑)	母岩変質(白化)し細礫化。
瑞浪花崗岩⑧ (12MI31 20.37m-20.44 m)	中粒花崗岩	充填物	暗緑色粘土鉱物充填。破砕・
		暗緑色	固結した個所が変質。
瑞浪花崗岩⑨(13MI36 3.71m-4.00 m)	中粒花崗岩	充填物	白色鉱物と淡緑色粘土鉱物が
		白色・淡緑	帯状に充填。
瑞浪花崗岩⑪(13MI36 9.09m-9.46m)	中粒花崗岩	母岩	母岩が全体に変質(白化)し脆
		白色~淡緑	弱。
瑞浪花崗岩⑮(13MI37 0.66m-0.79m)	中粒花崗岩	母岩	灰白色鉱物充填。微細亀裂多
		灰白~淡緑	数も固結。
瑞浪花崗岩⑯(13MI37 6.86m-7.00m)	中粒花崗岩	充填物	白色鉱物および淡緑色粘土鉱
		灰白・淡緑	物が帯状に充填。

表 3.4.1-5 X 線回折分析試料一覧

分析方法は下記の通りである。また、図 3.4.1-4 に分析のフロー図を示す。

- (1) 全岩分析方法
 - 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、分析試料とする。
 - ② 測定回折角(2θ)は3~60°で XRD 分析を行なう。
 - ③ ②の結果、粘土鉱物が認められた場合は、以下の定方位分析を行なう。
- (2) 定方位分析方法
 - 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4.5 cmまでの上ずみを採取する。
 - ② ①の上ずみ液を遠心分離機で試料粒子を沈下させて、スラドグラスに塗り、これを風乾させて試料とする。残った試料は後の分析のため取り置く。
 - ③ 測定回折角(2θ)は3~40°で XRD 分析を行なう。
 - ④ ③の結果、スメクタイトまたは緑泥石の存在が疑われる場合は以下の分析を行なう。
 - ⑤ スメクタイトが存在する可能性がある場合、③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、半乾きの状態で XRD 分析を行なう。この際の測定回 折角(2θ)は3~40°とする。
 - ⑥ 緑泥石の存在する可能性がある場合、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、XRD 分析を行なう。この際の測定回折角(20)は3~40°とする。



図 3.4.1-4 X線回折分析フロー図

(3) 分析結果

X線回折による鉱物分析結果を表 3.4.1-6 に示す。石英や長石などの普遍的な造石鉱物以外の 特徴的な鉱物について述べる。多胡砂岩はカオリナイトが多く認められおり、風化による作用で 生じたものと考えられる。藤枝砂岩は雲母族の鉱物が認められるが微量であり、2次鉱物の生成 が認められない。幌延泥岩はオパール、スメクタイト、雲母族鉱物が認められる。オパールは珪 藻質の泥岩が続性作用に伴う珪質化に伴って生じたものであり、間隙構造の変化が伴っていると 考えられる(後述する間隙率の測定では40%程度の値が得られている)。瑞浪花崗岩については、 割れ目充填鉱物と母岩の両方に、方解石、緑泥石、雲母族鉱物が普遍的に認められる。石橋ほか

(2014)よれば、変質した母岩や割れ目の充填鉱物には絹雲母が認められるとしており、本分析 で認められた雲母族の鉱物も絹雲母である可能性が高い。スメクタイトは方解石脈と共に認めら れることが多いが、緑泥石の多い所では認められない傾向にある。

試料名(コア試料は孔名_深度)	方解石	緑泥石	雲母	スメクタイ	カオリナイ	オパー
				F	F	ル
多胡砂岩①					++	
多胡砂岩②					++	
藤枝砂岩①			+			
幌延泥岩③(HCD-3 463.05m-463.56m)			+	+		O
幌延泥岩④(HCD-3 572.40m-572.55m)			+	+		O
幌延泥岩⑥(HCD-3 670.66m-671.00m)			+	+		0
瑞浪花崗岩① (12MI30 6.68m-6.78m)	++	+	+	++		
瑞浪花崗岩⑤(12MI30 22.54m-22.77	+	++	+			
m)						
瑞浪花崗岩⑥(12MI318.31m-8.40m)	+	+	+	++		
瑞浪花崗岩⑧(12MI31 20.37m-20.44	0	0	+			
m)						
瑞浪花崗岩⑨(13MI363.71m-4.00m)	Ø	+	+	O		
瑞浪花崗岩⑪(13MI36 9.09m-9.46m)	+	+	+	+		
瑞浪花崗岩⑮(13MI37 0.66m-0.79m)	++	+	+			
瑞浪花崗岩⑯(13MI37 6.86m-7.00m)	0	+	+	0		

表 3.4.1-6 X線回折分析試料

含有量(相対比較):◎>○>++>+

3.4.1.3 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多胡砂岩、藤枝砂岩、幌延泥岩、瑞 浪花崗岩について分析を実施した。ラジウムの分析試料は表 3.4.1-1 の元素分析試料と同じものであ る。ラジウムの分析方法は文部科学省(1990 および 1990)に準拠し、U-8 容器に粉砕した試料岩石を 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 よって測定した。すなわち、Bi-214 の濃度をそのまま Ra-226 濃度と読み替えてよい。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。分析結果を表 3.4.1-7 に示す。堆積岩試料の比較では、幌延泥岩のラジウム濃度が多胡砂岩および藤枝砂岩よりも 高い。また、同じ藤枝砂岩と多胡砂岩では、藤枝砂岩がよりラジウム濃度が高く、元素分析から藤枝 砂岩が泥岩に近い組成を有することと整合する。瑞浪花崗岩では変質が認められる瑞浪花崗岩④と⑩ のラジウム濃度が高く、粘土鉱物のラジウム濃度が高い可能性がある。

		U	系列		Th 系列				
	ICP	-MS	γ 線	測定	ICP	-MS	γ線測定		
試料名	U		Bi-214	Pb-214	Th		Ac-228	Pb-212	Bi-212
	Bq/kg	mg/kg	Bq/kg	mg/kg	Bq/k g	mg/k g	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg
多胡砂岩①	16.5	1.33	13±1	16±1	29. 3	7.14	26±1	26±0	24±3
多胡砂岩②	13.8	1.11	12±1	14±1	26.5	6.46	24±1	26±1	22±3
藤枝砂岩①	18.4	1.49	16±1	18±1	25.0	6.09	20±1	22±1	21±3
幌延泥岩②(HCD-3 452.83m-453.00m)	36.5	2.94	30 ± 1	35±1	18.6	4.55	15±1	17±0	11±3
幌延泥岩④(HCD-3 572.40m-572.55m)	40.1	3.24	32 ± 1	39±1	22. 0	5.36	20±1	21±1	26±3
幌延泥岩⑥(HCD-3 670.66m-671.00m)	36.1	2.92	29±1	36±1	21.1	5.15	21±1	22±1	18±3
瑞浪花崗岩② (12MI30 12.55m-12.68m)	63.7	5.14	58 ± 1	67±1	84. 4	20.6	79±2	86±1	89±5
瑞浪花崗岩④(12MI3021.67m-21.75m)	185	14. 9	159 ± 2	189±2	93.7	22. 9	86±2	92±1	87±6
瑞浪花崗岩⑪(13MI36 8.30m-8.40m)	81.0	6.54	72±1	84±1	83. 0	20. 2	83±2	87±1	83±5
瑞浪花崗岩⑬(13MI36 11.00m-11.19m)	74.6	6.02	65±1	76±1	92. 2	22.5	88±2	95±1	92±5
瑞浪花崗岩⑪ (13MI37 13.90m-14.00m)	74.5	6.01	70±1	82±1	90. 8	22. 1	82±2	88±1	84±5
瑞浪花崗岩⑲(13MI37 24.40m-24.55m)	87.2	7.03	78±1	92±1	102	24. 9	96±2	104±1	98±5

表 3.4.1-7 ラジウム分析試料一覧

3.4.1.4 物性測定

昨年度における本事業では、間隙率がラドンフラックスへ影響を与える可能性について示した。こ のため、本年度の試料についても間隙率を測定するとともに、ラドンの発生量に影響を与える可能性 がある比表面積についても測定した。測定は 10cm 程度の試料のバルク密度と間隙率、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 法によって行なった。

(1) 間隙率測定

バルク密度と間隙率は JIS A 1110 (2006) に準拠して、粗骨材の密度及び吸水率試験法試料 重量を空気中で測定し、2 日間蒸留水中で含水させ、水中で試料重量を測定し、表面水を拭き取 った後、再度重量を測定した。その後、試料を 105℃で 2 日間乾燥させ、乾燥重量を測定した。 測定試料の結果を表 3.4.1-8 に示す。オパールの生成により珪質化している幌延泥岩は間隙率が 40%前後となっている。多胡砂岩と藤枝砂岩とを比較した場合、藤枝砂岩の間隙率がより小さく、 元素分析などから泥岩に近い組成であることと整合する。瑞浪花崗岩では変質が認められる⑤と ⑫の間隙率が相対的に大きく、変質に伴う鉱物の溶脱や粘土鉱物の生成により間隙率が高くなっ ていると考えられる。

	コア	密度	眼咙荧	ᅖᄮᇔ		
試料名(コア試料は孔名_深度)	絶乾	表 乾	间原平	吸水平	備考	
	g/cm ³	g/cm³	%	%		
多胡砂岩①	1. 982	2.119	13. 71	6.95		
多胡砂岩②	2. 018	2.142	12.46	6.19		
藤枝砂岩①	2.379	2.468	8. 92	3. 73		
幌延泥岩①(HCD-3 427.79m-428.00m)	1. 485	1.862	38.45	25.43	稚内層	
幌延泥岩⑤(HCD-3 551.65m-552.00m)	1. 428	1.831	40.84	28. 25	稚内層	
幌延泥岩⑥(HCD-3 670.66m-671.00m)	1. 428	1.831	41.05	28.20	稚内層	
瑞浪花崗岩③	2 622	2 620	0.75	0.20		
(12MI30 17.20m-17.34m)	2. 022	2.029	0.75	0. 29		
瑞浪花崗岩⑤	2 626	2 6/1	1 51	0.57	暗緑色粘土鉱物充填。割れ目沿い母岩変質(白	
(12MI30 22.58m-22.72m)	2. 020	2.041	1. 51	0. 57	化)	
瑞浪花崗岩⑦	2 624	2 621	0 71	0.27		
(13MI31 15.84m-15.98m)	2. 024	2.001	0.71	0.27		
瑞浪花崗岩⑪	2 618	2 629	1 08	0.41	弱変質(周囲に比べて母岩が白色化)	
(13MI36 10.05m-10.19m)	2.010	2.023	1.00	U. TI		
瑞浪花崗岩⑭	2 621	2 630	0.83	0 32		
(13MI36 12.38m-12.52m)	2. 021	2. 500	0.00	0. 02		
瑞浪花崗岩118	2 620	2 628	0 79	0.30		
(13MI37 15.02m-15.16m)	2. 020	2. 520	5.75	0.00		

表 3.4.1-8 間隙率測定試料一覧と測定結果

測定方法は JIS A 1110 粗骨材の密度及び吸水率試験法に準拠

瑞浪花崗岩⑤は12MI30 22.54m-22.77mの両端をトリミングし 22.58m-22.72m を使用

(2) 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、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PoreSizer9320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 3.4.1-9に示す。なお、変 質した瑞浪花崗岩では、割れ目充填鉱物そのものは崩れやすく測定できないため、充填鉱物があ る割れ目面の接する母岩部をトリミングして測定した。

試料名(コア試料は孔名_深度)	岩石名	備考
多胡砂岩①	中粒~粗粒砂岩	
多胡砂岩②	中粒~粗粒砂岩	
藤枝砂岩①	細粒~中粒砂岩	
幌延泥岩③(HCD-3 463.05m-463.56mm)	珪質泥岩	稚内層
幌延泥岩④(HCD-3 572.40m-572.55m)	珪質泥岩	稚内層
幌延泥岩⑥(HCD-3 670.66m-671.00m)	珪質泥岩	稚内層※1
瑞浪花崗岩③(12MI30 17.20m-17.34m)	中粒花崗岩	
瑞浪花崗岩⑤(12MI30 22.54m-22.77m)	中粒花崗岩	暗緑色粘土鉱物充填。割れ目沿い母岩変質(白化)
瑞浪花崗岩⑦(12MI31 15.84m-15.98m)	中粒花崗岩	
瑞浪花崗岩⑧(12MI31 20.37m-20.44m)	中粒花崗岩	暗緑色粘土鉱物充填。破砕・固結した個所が変質。
瑞浪花崗岩⑨(13MI36 3.795m-4.00m)	中粒花崗岩	白色鉱物と淡緑色粘土鉱物が帯状に充填。
瑞浪花崗岩⑪(13MI36 9.085m-9.25m)	中粒花崗岩	母岩が全体に変質(白化)し脆弱
瑞浪花崗岩⑭(13MI36 12.38m-12.52m)	中粒花崗岩	
瑞浪花崗岩⑮(13MI37 0.66m-0.79m)	中粒花崗岩	灰白色鉱物充填。微細亀裂多数も固結。
瑞浪花崗岩⑯(13MI37 6.86m-7.00m)	中粒花崗岩	白色鉱物および淡緑色粘土鉱物が帯状に充填。

表 3.4.1-9 細孔分布測定試料一覧

測定結果を表 3.4.1-10 に示す。堆積岩の気孔率は多胡砂岩で 20%~22%、藤枝砂岩で 8%、幌延泥 岩で 22~32%である。バルクの間隙率に比較すると、多胡砂岩では細孔分布測定での結果が大きな 値が得られる一方、幌延泥岩では細孔分布測定の間隙率が小さい結果が得られている。幌延泥岩に ついては細孔径が 0.01 µm以下の細孔が主体であり、ポアサイザーでは十分にこれらの間隙が評価 できていないためと考えられる。一方、多胡砂岩における細孔分布測定の気孔率が間隙率測定より 大きく得られるのは、間隙率測定の方が細孔径 1µm 以下の細孔を評価ができていない可能性があ る。瑞浪花崗岩については変質していない試料は 0.3%~0.5%の気孔率が得られている。変質してい る試料は 1.5%~6.2%の気孔率となっており、0.1µm径の細孔の増加している。

(3) 比表面積測定(BET法)

BET 法による比表面積の測定は BET1 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 (N₂:30%、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。この離脱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 に調整したものを用いた。

	かさ 密度	真密度	気孔率	全細孔 体積	全細孔 表面積	Media	n 径	平均細 孔直径	Mode	径
試料名 (コア試料は孔名_深度)			[間隙率]	11 12		体積基準	表面積 基準	4V/A	体積基準	表面積 規準
	g/cc	g/cc	%	cc/g	m²/g	μ m	μ m	μ m	μ m	μ m
多胡砂岩①	2.0002	2.5590	21.8391	0.1092	2.0924	0.8732	0.0386	0.2087	1.3447	0.0115
多胡砂岩②	1.9179	2.3859	19.6147	0.1023	1.2340	1.7274	0.0580	0.3315	1.8226	0. 0398
藤枝砂岩①	2.3661	2. 5937	8.7756	0.0371	1.6143	0. 4891	0.0216	0.0919	0.9446	0.0110
幌延泥岩③ (HCD-3 463.05m-463.56m)	1. 5159	2. 1557	29. 6792	0. 1958	56. 8044	0. 0151	0. 0092	0. 0138	0. 0093	0. 0088
幌延泥岩④ (HCD-3 572.40m-572.55m)	1. 5172	1. 9420	21. 8753	0. 1442	51.3735	0. 0103	0. 0078	0.0112	0. 0070	0. 0060
幌延泥岩⑥ (HCD-3 670.66m-671.00m)	1. 4966	2. 1860	31. 5371	0. 2107	61.4009	0. 0173	0. 0084	0.0137	0. 0075	0. 0070
瑞浪花崗岩③ (12MI30 17.20m-17.34m)	2. 6116	2. 6188	0. 2765	0. 0011	0. 0115	0. 4255	0. 2014	0. 3692	0. 4093	0. 1743
瑞浪花崗岩⑤ (12MI30 22.54m-22.77m)	2. 5929	2. 6602	2. 5281	0. 0097	0. 0435	112. 8530	0. 1732	0. 8969	247. 9970	0. 0666
瑞浪花崗岩⑦ (12MI31 15.84m-15.98m)	2. 6154	2. 6259	0. 4003	0. 0015	0. 0196	0. 4414	0. 1895	0. 3126	0. 2144	0. 2055
瑞浪花崗岩⑧ (12MI31 20.37m-20.44m)	2. 6967	2. 8032	3. 7999	0. 0141	0. 5482	0. 1381	0. 0681	0. 1028	0. 1058	0. 0655
瑞浪花崗岩⑨ (13MI36 3.80m-4.00m)	2. 5811	2. 6298	1. 8499	0. 0072	0. 1269	0. 4945	0. 1072	0. 2259	0. 7574	0. 0385
瑞浪花崗岩① (13MI36 9.09m-9.25m)	2. 3875	2. 5442	6. 1617	0. 0258	0. 4449	3. 1165	0. 0244	0. 2321	5. 1088	0. 0209
瑞浪花崗岩⑭ (13MI36 12.38m-12.52m)	2. 6151	2. 6292	0. 5381	0. 0021	0. 0182	30. 7645	0. 1264	0. 4531	52. 2754	0. 0697
瑞浪花崗岩⑮ (13MI37 0.66m-0.79m)	2. 5784	2. 6168	1. 4691	0.0057	0. 0443	1. 1312	0. 1997	0. 5139	0. 8587	0. 0873
瑞浪花崗岩⑯ (13MI37 6.86m-7.00m)	2. 5464	2. 6088	2. 3925	0. 0094	0. 5550	0. 2369	0. 0252	0. 0677	0. 0251	0. 0225

表 3.4.1-10 細孔分布測定結果

比表面積測定の測定試料と測定結果を表 3.4.1-11 に示す。この結果でよれば、平均粒径 1.34mm および 0.64mm の試料に違いによる試料間での相対的な比表面積の大きさの割合は変わらない。 平均粒径が 1.34mm での試料で得た結果を考察した場合、堆積岩では多胡砂岩の比表面積が 2.4m²/g~4.8 m²/g、藤沢砂岩は 6.9 m²/g であった。間隙率や気孔率は多胡砂岩が藤枝砂岩よりも 大きいが、比表面積については藤枝砂岩のほうが多胡砂岩よりも大きい値がえられている。幌延 泥岩は多胡砂岩や藤沢砂岩より大分大きく、53 m²/g~61 m²/g の値が得ている。端浪花崗岩は未 変質部で 0.11 m²/g ~0.17 m²/g に対して、変質部では 0.16 m²/g~2.29 m²/g となっており、粘 土鉱物など存在により比表面積が増大していると考えられる。。

試料名		全表面積		比表	
(コア試料は孔名_深度)		(m ²)		面積	備考
試料粒径:#9>X>#20:平均粒径 1.34mm	1 st	2 nd	平均	m²/g	
多胡砂岩①	4. 001	3.988	3.995	4. 775	
多胡砂岩②	2. 554	2.576	2.565	2. 411	
藤枝砂岩①	7.143	7.163	7.153	6.865	
幌延泥岩③(HCD-3 463.05m-463.56m)	23.830	24. 170	24.000	52.505	稚内層
幌延泥岩④(HCD-3 572.40m-572.55m)	26.260	26.400	26.330	60.459	稚内層
幌延泥岩⑥(HCD-3 670.66m-671.00m)	26.630	26.780	26.705	60.611	稚内層
瑞浪花崗岩③(12MI30 17.20m-17.34m)	0.154	0.173	0.164	0.155	
瑞浪花崗岩⑤(12MI30 22.54m-22.77m)	0. 158	0. 172	0. 165	0. 157	暗緑色粘土鉱物充填。割れ目沿い母岩変質(白 化)
瑞浪花崗岩⑦(12MI31 15.84m-15.98m)	0.123	0.121	0.122	0.113	
瑞浪花崗岩⑧(12MI31 20.37m-20.44m)	0.465	0.460	0. 463	0. 432	暗緑色粘土鉱物充填。破砕・固結した個所が変 質。
瑞浪花崗岩⑨(13MI36 3.80m-4.00m)	0.441	0.462	0.452	0.419	白色鉱物と淡緑色粘土鉱物が帯状に充填。
瑞浪花崗岩⑪(13MI36 9.09m-9.25m)	2. 391	2.406	2.399	2. 291	母岩が全体に変質(白化)し脆弱
瑞浪花崗岩⑭(13MI36 12.38m-12.52m)	0.176	0.195	0.186	0.173	
瑞浪花崗岩⑮(13MI37 0.66m-0.79m)	1.100	1.095	1.098	1.030	灰白色鉱物充填。微細亀裂多数も固結。
瑞浪花崗岩(16) (13MI37 6,86m-7,00m)	1,470	1 462	1 466	1 388	白色鉱物および淡緑色粘土鉱物が帯状に充填。
				1.000	
試料名		全表面積		比表	
		全表面積 (m ²)		上表 面積	備考
試料名 (コア試料は孔名_深度) 試料粒径:#20≫X>#30:平均粒径 0.64mm	1 st	全表面積 (m ²) 2 nd	平均	比表 面積 m ² /g	備考
試料名 (コア試料は孔名_深度) 試料粒径:#20>X>#30:平均粒径 0.64mm 多胡砂岩①	1 st 2. 983	全表面積 (m ²) 2 nd 2.994	平均 2.989	比表 面積 m ² /g 4.393	備考
試料名 (コア試料はれ名_深度) 試料粒径:#20)X>#30:平均粒径 0.64mm 多胡砂岩① 多胡砂岩②	1 st 2. 983 1. 578	全表面積 (m ²) <u>2nd</u> 2.994 1.547	平均 2.989 1.563	比表 面積 m ² /g 4.393 2.295	備考
試料名 (コア試料はれ名_深度) 試料粒径:#20)X〉#30:平均粒径 0.64mm 多胡砂岩① 多胡砂岩② 藤枝砂岩①	1 st 2. 983 1. 578 4. 723	全表面積 (m ²) 2 ^{rrd} 2.994 1.547 4.748	平均 2.989 1.563 4.736	比表 面積 ^{m²/g 4.393 2.295 6.964}	備考
試料名 (コア試料は孔名_深度) 試料粒径:#20>X>#30:平均粒径 0.64mm 多胡砂岩① 多胡砂岩② 藤枝砂岩① 幌延泥岩③(HCD-3 463.05m-463.56m)	1 st 2. 983 1. 578 4. 723 15. 120	全表面積 (m ²) 2.994 1.547 4.748 15.160	平均 2.989 1.563 4.736 15.140	比表 面積 m ² /g 4.393 2.295 6.964 53.235	備考
試料名 (コア試料は孔名_深度) 試料粒径:#20>X>#30:平均粒径 0.64mm 多胡砂岩① 多胡砂岩② 藤枝砂岩① 幌延泥岩③(HCD-3 463.05m-463.56m) 幌延泥岩④(HCD-3 572.40m-572.55m)	1 st 2. 983 1. 578 4. 723 15. 120 17. 610	全表面積 (m ²) 2 nd 2.994 1.547 4.748 15.160 17.460	平均 2.989 1.563 4.736 15.140 17.535	比表 面積 ^{m²/g} 4.393 2.295 6.964 53.235 60.134	備考 備考 稚内層 稚内層
武料名 (コア試料は孔名_深度) (3) (3) (3) (3) (4) (4) (4) (4) (4) (4) (4) (4) (4) (4	1 st 2. 983 1. 578 4. 723 15. 120 17. 610 17. 760	全表面積 (m ²) 2 nd 2.994 1.547 4.748 15.160 17.460 17.820	平均 2.989 1.563 4.736 15.140 17.535 17.790	比表 面積 m ² /g 4.393 2.295 6.964 53.235 60.134 61.578	 備考
試料名 (コア試料は孔名_深度) 試料粒径:#20>X>#30:平均粒径 0.64mm 多胡砂岩① 多胡砂岩① 藤枝砂岩① 幌延泥岩③(HCD-3 463.05m-463.56m) 幌延泥岩④(HCD-3 572.40m-572.55m) 幌延泥岩⑥(HCD-3 670.66m-671.00m) 瑞浪花崗岩③(12M130 17.20m-17.34m)	1 st 2. 983 1. 578 4. 723 15. 120 17. 610 17. 760 0. 079	全表面積 (m ²) 2 nd 2.994 1.547 4.748 15.160 17.460 17.820 0.096	平均 2.989 1.563 4.736 15.140 17.535 17.790 0.088	た に よ こ 3 3 5 3 5 3 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	備考 備考 種内層 種内層
試料名 (コア試料は孔名_深度) 試料粒径:#20>X>#30:平均粒径 0.64mm 多胡砂岩① 多胡砂岩② 藤枝砂岩① 幌延泥岩③(HCD-3 463.05m-463.56m) 幌延泥岩④(HCD-3 572.40m-572.55m) 幌延泥岩⑥(HCD-3 670.66m-671.00m) 瑞浪花崗岩③(12M130 17.20m-17.34m) 瑞浪花崗岩⑤(12M130 22.54m-22.77m)	1 st 2. 983 1. 578 4. 723 15. 120 17. 610 17. 760 0. 079 0. 099	全表面積 (m ²) 2 rd 2.994 1.547 4.748 15.160 17.460 17.820 0.096 0.097	平均 2.989 1.563 4.736 15.140 17.535 17.790 0.088 0.098	た に 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	 借考 備考 種内層 稚内層 稚内層 1 暗緑色粘土鉱物充填。割れ目沿い母岩変質(白化)
訪料名 (コア試料は孔名_深度) 試料粒径:#20>X>#30:平均粒径 0.64mm 多胡砂岩① 多胡砂岩② 藤枝砂岩① 幌延泥岩③ (HCD-3 463.05m-463.56m) 幌延泥岩④ (HCD-3 572.40m-572.55m) 幌延泥岩⑥ (HCD-3 670.66m-671.00m) 瑞浪花崗岩③ (12M130 17.20m-17.34m) 瑞浪花崗岩⑤ (12M130 22.54m-22.77m) 瑞浪花崗岩⑦ (12M131 15.84m-15.98m)	1 st 2. 983 1. 578 4. 723 15. 120 17. 610 17. 760 0. 079 0. 099 0. 092	全表面積 (m ²) 2 rd 2.994 1.547 4.748 15.160 17.460 17.820 0.096 0.097 0.082	平均 2.989 1.563 4.736 15.140 17.535 17.790 0.088 0.098	た に 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	備考 備考 種内層 種内層 種内層 種内層 種内層 種内層 種内層 種内層
試料名 (コア試料は孔名_深度) 試料粒径:#20>X>#30:平均粒径 0.64mm 多胡砂岩① 多胡砂岩① ●胡砂岩② 藤枝砂岩① 幌延泥岩③ (HCD-3 463.05m-463.56m) 幌延泥岩④ (HCD-3 572.40m-572.55m) 幌延泥岩⑥ (HCD-3 670.66m-671.00m) 瑞浪花崗岩③ (12M130 17.20m-17.34m) 瑞浪花崗岩⑤ (12M130 22.54m-22.77m) 瑞浪花崗岩⑤ (12M131 15.84m-15.98m) 瑞浪花崗岩⑧ (12M131 20.37m-20.44m)	1 st 2. 983 1. 578 4. 723 15. 120 17. 610 17. 760 0. 079 0. 099 0. 092 0. 366	全表面積 (m ²) <u>2nd</u> 2.994 1.547 4.748 15.160 17.460 17.820 0.096 0.097 0.082 0.355	平均 2.989 1.563 4.736 15.140 17.535 17.790 0.088 0.098 0.087 0.361	た 比表 面積 m ² /g 4.393 2.295 6.964 53.235 60.134 61.578 0.130 0.149 0.132 0.534	借る (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)
試料名 (コア試料は孔名_深度) 試料粒径:#20>X>#30:平均粒径 0.64mm 多胡砂岩① 多胡砂岩① 藤枝砂岩① 順延泥岩③(HCD-3 463.05m-463.56m) 幌延泥岩④(HCD-3 572.40m-572.55m) 幌延泥岩⑥(HCD-3 670.66m-671.00m) 端浪花崗岩③(12M130 17.20m-17.34m) 瑞浪花崗岩⑤(12M130 22.54m-22.77m) 瑞浪花崗岩⑦(12M131 15.84m-15.98m) 瑞浪花崗岩⑧(12M131 20.37m-20.44m) 瑞浪花崗岩⑨(13M136 3.80m-4.00m)	1 st 2. 983 1. 578 4. 723 15. 120 17. 610 17. 610 17. 760 0. 079 0. 099 0. 092 0. 366 0. 367	全表面積 (m ²) 2 nd 2.994 1.547 4.748 15.160 17.460 17.820 0.096 0.097 0.082 0.355 0.357	平均 2.989 1.563 4.736 15.140 17.535 17.790 0.088 0.098 0.087 0.361 0.362	た 比表 面積 m ² /g 4.393 2.295 6.964 53.235 60.134 61.578 0.130 0.149 0.132 0.534 0.535	備考 備考 種内層 種内層 暗緑色粘土鉱物充填。割れ目沿い母岩変質(白 化) 暗緑色粘土鉱物充填。破砕・固結した個所が変 質。 白色鉱物と淡緑色粘土鉱物が帯状に充填。
訪料名 (コア試料は孔名_深度) 試料粒径:#20>X>#30: 平均粒径 0.64mm 多胡砂岩① 多胡砂岩② 藤枝砂岩①	1 st 2. 983 1. 578 4. 723 15. 120 17. 610 17. 760 0. 079 0. 099 0. 092 0. 366 0. 367 1. 100	全表面積 (m ²) 2 rd 2.994 1.547 4.748 15.160 17.460 17.460 17.820 0.096 0.097 0.082 0.355 0.357 1.119	平均 2.989 1.563 4.736 15.140 17.535 17.790 0.088 0.098 0.087 0.361 0.362 1.110	た 比表 面積 m ² /g 4.393 2.295 6.964 53.235 60.134 61.578 0.130 0.149 0.132 0.534 0.535 1.651	備考 備考 種内層 種内層 種内層 種内層
訪料名 (コア試料は孔名_深度) 試料粒径:#20>X>#30:平均粒径 0.64mm 多胡砂岩① 多胡砂岩① ●胡砂岩② 藤枝砂岩① 幌延泥岩③ (HCD-3 463.05m-463.56m) 幌延泥岩④ (HCD-3 572.40m-572.55m) 幌延泥岩⑥ (HCD-3 670.66m-671.00m) 端浪花崗岩③ (12M130 17.20m-17.34m) 瑞浪花崗岩⑤ (12M130 22.54m-22.77m) 瑞浪花崗岩⑤ (12M131 15.84m-15.98m) 瑞浪花崗岩⑧ (13M136 3.80m-4.00m) 瑞浪花崗岩⑪ (13M136 12.38m-12.52m)	1 st 2. 983 1. 578 4. 723 15. 120 17. 610 17. 760 0. 079 0. 099 0. 099 0. 092 0. 366 0. 367 1. 100 0. 100	全表面積 (m ²) 2 rd 2.994 1.547 4.748 15.160 17.460 17.460 17.820 0.096 0.097 0.082 0.355 0.355 0.357 1.119 0.090	平均 2.989 1.563 4.736 15.140 17.535 17.790 0.088 0.098 0.087 0.361 0.362 1.110 0.095	た 比表 面積 m ² /g 4.393 2.295 6.964 53.235 60.134 61.578 0.130 0.149 0.132 0.535 1.651 0.145	備考 備考 種内層 種内層 種内層 種内層
訪料名 (コア試料は孔名_深度) 試料粒径:#20>X>#30:平均粒径0.64mm 多胡砂岩① 多胡砂岩① 多胡砂岩① 寒枝砂岩① 幌延泥岩③(HCD-3 463.05m-463.56m) 幌延泥岩④(HCD-3 572.40m-572.55m) 幌延泥岩⑥(HCD-3 670.66m-671.00m) 瑞浪花崗岩③(12M130 17.20m-17.34m) 瑞浪花崗岩⑤(12M130 22.54m-22.77m) 瑞浪花崗岩⑤(12M131 15.84m-15.98m) 瑞浪花崗岩⑧(13M136 3.80m-4.00m) 瑞浪花崗岩⑲(13M136 12.38m-12.52m) 瑞浪花崗岩⑲(13M136 12.38m-12.52m) 瑞浪花崗岩⑲(13M1370.66m-0.79m)	1 st 2. 983 1. 578 4. 723 15. 120 17. 610 17. 760 0. 079 0. 099 0. 099 0. 092 0. 366 0. 367 1. 100 0. 100 0. 712	全表面積 (m ²) 2 nd 2.994 1.547 4.748 15.160 17.460 17.460 17.820 0.096 0.097 0.082 0.355 0.355 0.357 1.119 0.090 0.723	平均 2.989 1.563 4.736 15.140 17.535 17.790 0.088 0.098 0.087 0.361 0.362 1.110 0.095 0.718	た 比表 面積 m ² /g 4.393 2.295 6.964 53.235 60.134 61.578 0.130 0.149 0.132 0.534 0.535 1.651 0.145 1.054	備考 備考 椎内層 椎内層 椎内層 暗緑色粘土鉱物充填。割れ目沿い母岩変質(白 化) 暗緑色粘土鉱物充填。破砕・固結した個所が変 質。 白色鉱物と淡緑色粘土鉱物が帯状に充填。 母岩が全体に変質(白化)し脆弱 灰白色鉱物充填。微細亀裂多数も固結。

表 3.4.1-11 測定試料一覧と測定結果

3.4.2 堆積岩のラドンフラックスの測定

3.4.2.1 ラドンフラックスの測定方法

室内でのラドンフラックスの測定では、岩石を整形し、その表面積を計測すると共に、金属の気密 容器に一定期間封入した後に、容器内のラドン濃度を測定する。これらの濃度からラドン発生量を計 算し、これを表面積で除することでラドンのフラックスを得る。図 3.4.2-1 に試料を浸漬した場合の 測定例を示す。



図 3.4.2-1 岩石からのラドンフラックスの測定例

図 3.4.2-1 の写真は気密容器に花崗岩をセットした例である。試料の表面積を実測し、浸漬後のラ ドン発生量を得て、右上のグラフの関係(傾き=フラックス)を得る。計測は静電捕集型計測装置で ある Rad7 による計測と低濃度のラドンの計測手法を検討するために、ラドンを活性炭に吸着させた試 料のガンマ線スペクトロメータによる分析を実施し、容器内を蒸留水で満たした場合は、ガンマ線ス ペクトロメータの代替として液体シンチレーションカウンター(LSC)による計測を実施した。

(1) ラドンフラックスの測定試料

多胡砂岩、藤枝砂岩、幌延泥岩のラドンフラックスを測定した。これらの堆積岩と比較のため、 蛭川花崗岩を併せて計測した。蛭川花崗岩は岐阜県中津川に分布する苗木花崗岩体に属するもの である。多胡砂岩、藤枝砂岩、蛭川花崗岩は方形試料であり、幌延泥岩はコア(円柱状)試料で ある。

a. 多胡砂岩、藤枝砂岩、蛭川花崗岩の測定

多胡砂岩、藤枝砂岩、蛭川花崗岩の3種類の岩石試料の厚さ変えてラドン発生量の測定をした。 試料は縦、横の長さは10cmとし、厚さを2cm、4cm、7cm、10cm、14cm(それぞれサイズA~Eと 呼称)と変えた試料を準備した。また、発生するラドンの総量を増やして計測を容易とするため に、サイズの小さい試料ほど試料数を増やした。表3.4.2-1に方形岩石試料のトリミングの寸法 と試料数を示す。なお、実際のフラックスの算定においては、試料の表面積の総和を精度よく算 出するために、各試料のサイズを実測している。

サイズ名称	形状(縦×横×厚さ)	表面積/個	体積/個	個数
サイズA	$10 \text{cm} \times 10 \text{cm} \times 2 \text{cm}$	280cm^2	200cm ³	48
サイズB	$10 \text{cm} \times 10 \text{cm} \times 4 \text{cm}$	360cm^2	400cm ³	28
サイズC	$10 \text{cm} \times 10 \text{cm} \times 7 \text{cm}$	$480 \mathrm{cm}^2$	700cm ³	16
サイズD	$10 \text{cm} \times 10 \text{cm} \times 10$ cm	600cm^2	1,000cm ³	12
サイズE	$10 \text{cm} \times 10 \text{cm} \times 14 \text{ cm}$	760cm ²	1, 400cm ³	8

表 3.4.2-1 方形岩石試料の寸法と試料数

b. 幌延泥岩コア試料の測定

幌延泥岩のラドン発生量の計測は20本のコアの整形(トリミング)とラドン発生量計測とを繰 り返しながら実施した。HCD-3 孔の稚内層のコアから14cm以上の長さがあり、また潜在割れ目のな いコアを選定し、コア長を14cm長さでトリミングし、ラドンフラックスの測定をする。その後は、 コアの上下端面を残してブチルゴムを巻き、14cm、10cm、7cm、4cm、2cmの順にトリミングとラド ンフラックスの測定を繰り返す(図 3.4.2-2)。なお、トリミングした各試料ともに直径は5.1~ 5.2cm程度で数量は20本である(表 3.4.2-2)。以上の全体の幌延泥岩のトリミングとラドン計測 フローを示す図 3.4.2-3 に示す。なお、フラックスの算定においては、試料の表面積の総和を精度 よく算出するために、各コア試料のサイズを実測している。



図 3.4.2-2 幌延泥岩ボーリングコアのトリミング方法

シーリング材(ブチルゴム)は一定厚さで塗布することが難しかったため実験ではブチルテープを用いた。

		トリ	ミングと	欠数	製作数	試験名	試験	
試料長	1次	2次	3次	4次	5次	合計		試料数
14cm	20本					20本	RUN 1 、RUN2	20本
10cm		20本				20本	RUN3	20本
7cm			20本			20本	RUN4	20本
4cm				20本		20本	RUN5	20本
2cm					20本	20本	RUN6	20本

表 3.4.2-2 トリミングした幌延泥岩コア数と試験試料数



図 3.4.2-3 幌延泥岩の計測フロー

(2) 測定結果

a. 多胡砂岩、藤枝砂岩、蛭川花崗岩のラドンフラックス

方形試料を用いて多胡砂岩、藤枝砂岩、蛭川花崗岩のラドンフラックスを測定した結果を図 3.4.2-4 に示す。なおラドンフラックスの単位は[atoms・cm⁻²・s⁻¹]であるが、ここではラドンの 濃度[Bq・L⁻¹]から算出するために便宜上[Bq・cm⁻²]の単位を用いている。得られたラドンフラッ クスは各試料ともに厚さが増すとともにフラックスの増加が頭打ちとなる傾向認められる。この 傾向が最も顕著なのは蛭川花崗岩で、試料の厚さが 10cm で既に一定に達しており、その際のラ ドンフラックスは 3.3×10⁻² Bq/m² である。多胡砂岩については減少傾向が認められるものの 15cm の厚さではまだフラックスが一定となっていない。藤枝砂岩については厚さ 7cm~9cm 間でフラ ックスが一定となっているように見えるが、厚さ 14cm の試料で再度大きくなっており、14cm の 試料については再度計測することも必要であると考える。これらの結果は岩石試料を使用した試料では、岩石表面におけるラドンフラックスには、内部からのからフラックスが寄与していることが明らかである。ラジウムから発生する際のラドンの反跳は鉱物中では非常に短いことから、岩石内部で発生したラドンは、鉱物粒子間や土粒子間、マイクロクラックなどを通して岩石表面に到達していることが考えられる。岩石表面でラドンフラックスとして寄与する深度は、本実験で得られた岩石では多胡砂岩>藤枝砂岩>蛭川花崗岩であり、概略には多胡砂岩 14cm 以上、藤枝砂岩 10cm、蛭川花崗岩は 7~10cm と見なすことができる。ラジウムの濃度は多胡砂岩 (12~13Bq/Kg) よりも藤枝砂岩 (16Bq/Kg) が大きいにも関わらず藤枝砂岩のラドンフラックスが小さい原因は間隙の違いにあると考えられる。バルクの間隙率で比較した場合は多胡砂岩 (12-14%)、藤枝砂岩 (9%)、気孔率で比較した場合は多胡砂岩 (20-22%)、藤枝砂岩 (9%)と間隙率、気孔率ともに多胡砂岩の方が大きい。この間隙の違いが、ラドンの発生深度を藤枝砂岩よりも多胡砂岩の方が大きくしていると考えられる。



図 3.4.2-4 多胡砂岩、藤枝砂岩、蛭川花崗岩のラドンフラックス測定結果

b. 幌延泥岩コアのラドンフラックス

幌延のコアのラドンフラックスを図 3.4.2-5 示す。ラドンフラックスはコアの長さが増すにつ れて増加するもの、頭打ちの傾向が認められる。幌延泥岩コアのラドンフラックスの測定におい ては、側面をブチルゴムで覆い、内部から発生したラドンがコアの長手(軸)方向にのみ移動す るようにした。ブチルゴムを巻かない状態の長さ14cmのコア20本のラドンの発生量は平衡状態 の換算で26.7Bqであり、ラドンフラックスは4.6×10⁻³Bq/cm²である。一方、ブチルゴムを巻い た状態での長さ14cmのコア20本のラドンの発生量は20.9Bqでありラドンフラックスは2.5×10⁻² Bq/cm²である。ブチルゴムを巻いた試料のフラックスが大きくなる理由は、側面からの発生して いたラドンの一部は、上下端面に回って発生するようになったためと解釈される。



図 3.4.2-5 幌延コアのラドンフラックス測定結果

以上をまとめると、ラドンの親核種であるラジウムの含有量は、幌延泥岩>藤枝砂岩>多胡砂岩の 順で大きいが、バルクの間隙率を測定すると幌延泥岩>多胡砂岩>藤沢泥岩の順に大きい。さらに、 これらの岩石のラドンフラックスを測定した場合(試料の厚さまたは長さ14cm)は、幌延泥岩>藤枝 砂岩>多胡砂岩の順で大きい。この結果からはラジウムの含有量がラドンフラックスへ最も影響を与 えていることを示している。多胡砂岩、藤沢砂岩、蛭川花崗岩の方形サンプルの厚さを変えてラドン フラックスを測定した場合、岩石の厚みが増すにつれフラックスも増加するが、厚さに対するフラッ クスの増加率は、厚さが増すほど小さくなる。この傾向は花崗岩>藤枝砂岩>多胡砂岩の順で顕著で あり、間隙率が大きい程、岩石の深部で発生したラドンが岩石表面まで到達し、フラックスに寄与し ていることを示している。幌延泥岩のコア側面をブチルゴムで覆い、コア上下端面のみからラドンを 発生するようにした場合は、コア長が14cmでもフラックスの増加傾向が認められる。このことから、 少なくとも表面から7cm深度で発生したラドンが、コア端面まで到達していると考えられる。以上の ことから、間隙率の大きい堆積岩については、岩石内部で発生したラドンが、岩石表面まで達してラ ドンフラックスの大きさに影響を与えることが明らかであり、堆積岩においてラドンフラックスを評 価する際は、ラドン発生深度を考慮して見積もる必要があると考える。 3.5 原位置ラドン濃度計測による割れ目の予察的評価

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間隙幅の評価は、スイスグリムゼルサイト (以降、GTS と呼称)で実施したのみである。GTS において適用した花崗岩は、割れ目の密度も小さく、 割れ目充填鉱物も少ない岩盤であった。翻って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(以降、 深度 300m ボーリング横坑と呼称)に適用し、その適用性を確認することとした。今後、当該地点にラ ドン濃度計測による割れ目間隙幅の評価手法を適用し、その適用性を評価するために、今年度よりそ の準備として原位置での予察的ラドン濃度計測を開始した。具体的には深度 300m ボーリング横坑に削 孔されたボーリング孔のラドン濃度を計測し、割れ目の間隙幅の評価を予察的に行い、適用の可能性 を確認するとともに課題を抽出した。

3.5.1 瑞浪コアによるラドンフラックスの測定

ラドン濃度による割れ目間隙幅の評価を行うためには、原位置の岩石を用いたラドンフラックスの 測定と、対象とする割れ目内の地下水に溶存するラドンの濃度を必要とする。ラドンフラックスの測 定では、深度 300m ボーリング横坑に削孔されたボーリング孔のコアを用い、室内試験によりラドンフ ラックスの測定を行った。測定方法は表 3.4.2.1 で示した方法と同様に、コアを整形し、その表面積 と体積を計測するとともに、金属の気密容器に一定期間封入した後に、容器内のラドン濃度を測定し た。測定は容器内を空気で満たした場合と、水に満たした場合の2通り実施する。2通り実施する理 由は空気と水ではラドンの溶解度や拡散係数が異なるためであり、坑道周辺岩盤の飽和状態、不飽和 状態がラドン発生量に大きく影響するためである。

3.5.1.1 瑞浪コアのラドンフラックスの測定方法

ラドンフラックスの測定に用いたボーリングコアは、深度300mボーリング横坑に削孔された12MI30 孔、12MI31 孔、13MI36 孔、13MI37 孔の4 孔で、コア試料割れ目なくマトリックス部の変質ができる だけない個所を各孔から14 試料採取した(表3.5.1-1)。採取したコアは長さ14cmにトリミングし、 またコア試料のサイズ(直径・長さ)を実測した。水での浸漬でフラックスを測定する場合は、トリ ミングしたコアを事前に水に浸漬して十分に脱気した後に測定した。試験は先に空気でフラックスの 測定を行い、時間の経過とともにラドンが放射平衡(約1カ月)に向けて順調に増加することを確認 した。水での浸漬では途中での採水することができないため、コアの封入から28日目のラドン濃度を 1回のみ計測した。

II	D	12MI30 孔			ID	12MI31 孔		ID	13MI36 孔			ID	13MI37 孔			
		m		m	m		m	m		m		m		m		m
	1	8. 57	-	9.00	5	12. 25	-	13.00	9	2. 31	-	2.58	13	10.00	-	10.73
	2	11.05		11.70	6	13.26	-	13. 72	10	10. 74	-	11.00	14	13. 18	-	13.63
	3	12.68	-	13.00	7	14.15	-	14.46	11	20.40	-	20.60	15	18.39	-	18.89
	4	16.47	-	17.00	8	23.00	-	23.28	12	21.70	-	22.000	16	24.00	-	24.35

表 3.5.1-1 ラドン発生試験に用いた瑞浪ボーリングコア

3.5.1.2 瑞浪コアのラドンフラックス測定結果

2.0

1.5

1.0

0.5 0.0

0.0

20.0

40.0

ingrowth (%)

60.0

ラドン濃度(

表 3.5.1-2 にラドンフラックスの測定結果を示す。封入容器を空気で満たした場合は、瑞浪花崗岩 を封入してから2日目、6日目、10日目、16日目、20日目の容器内のラドン濃度を計測した。放射平 衡時間に対する封入時間の割合(ingrowth:t/t_)とラドン濃度、時間経過と発生したラドン総量の関 係を図 3.5.1-1 に示す。封入容器を空気で満たした場合のラドン濃度の経過は、順調に増加して 30 日程度で放射平衡へ達することが推定された。各測定から得られたラドンフラックスは 8.8~9.5× 10⁻³ Bq/cm² とばらつきの少ない安定した値が得られている。一方、容器を水で浸漬した際のラドンフ ラックスは封入から 28 日目のラドン濃度の測定から 4.3×10⁻³ Bq/cm² であり、空気のおよそ半分であ った。この空気と水におけるフラックスの相違は、ラドンがどのような過程で、岩石から水または空 気に溶存するかに関係すると考えられる。例えば、水と空気ではラドンの拡散係数が異なり、ラドン がマイクロクラックなどを介して岩石内部からも供給されるとすれば、マイクロクラックの内部が水 か空気かでラドンフラックスに影響することとなる。

経過時間	ラドン濃度	ラドン総量	t/t _e	平衡ラドン濃度	コア表面積	水/空気体積	ラドンフラックス
t(日)	Bq/L	Bq	%	Bq/L	Cm ²	Cm ³	Bq/cm ²
2.190	1.06	19. 2	32.8	58.5	382.67	18167	9. 5E-03
6.059	2.00	36.4	66.7	54.6	382.67	18167	8.9E-03
10.196	2.61	47.4	84.3	56.2	382.67	18167	9.1E-03
16.116	2.83	51.4	94.6	54.3	382.67	18167	8.8E-03
20. 055	3.00	54.5	97.4	56.0	382.67	18167	9.1E-03
28.014	1.50	26.6	99.4	26.7	382.67	17751	4. 3E-03

表 3.5.1-2 瑞浪コアのラドンフラックスの測定結果



ගි 40.0

■ 30.0 第20.0

10.0

0.0

0.00

10.00

20.00

経過時間(日)

•空気

■水

30.00

t/te(ingrowth)はt:経過時間をte:放射平衡までの時間で除したものである。白抜きは空気、網かけは水での浸漬を示す。

v = 0.0151>

100.0

80.0

図 3.5.1-1 室内試験による時間経過のラドン発生量の関係 左図は ingrowth とラドン濃度の関係を、右図は経過時間とラドン総量の関係をそれぞれ示す

これは、堆積岩における間隙の場合も同じで、間隙が水か空気かのどちらで満たされているかによ って、ラドンフラックスの大きさが異なり、間隙率がより大きい場合は、フラックス差異が一層大き くなると考えられる。また、ラドンの水に対する溶解度は温度によって異なる。以上のことから、ラ ドンが岩石表面までに到達するプロセスと、ラドンの溶存量に影響を与える温度などの原位置の環境 を考慮してラドンフラックスを評価することが必要である。

3.5.2 原位置におけるラドンフラックス濃度測定と割れ目間隙評価

原位置におけるラドン濃度の測定は深度 300m ボーリング横坑に削孔された 13MI37 孔からの採水に よって行った。13MI37 孔にはマルチパカーシステムが入っており、水みちをパッカー間に挟むように 5 区間が設置されており、この区間より採水が可能となっている。採水は 2014 年 8 月 18 日に行い、 分析は Rad7 の測定により原位置でラドン濃度を計測するとともに、地下水を持ち帰り、液体シンチレ ーションカウンタでもラドン濃度を測定した。表 3.5.2-1 に測定結果を示す。

表 3.5.2-1 各モニタリング区間のラドン濃度測定結果

採水区間	LSC	RAD7
13MI37#1(26.11m-27.00m)	297±1	263 ± 17
13MI37#2(20.00m-25.11m)	262 ± 1	261±12
13MI37#3 (16.39m-19.00m)	246 ± 1	277±34
13MI37#4 (10,78m-15,39m)	334 ± 1	275 ± 20

LSC:液体シンチレーションカウンタ RAD7:静電捕集型ラドン濃度測定装置

現地で得られたラドン濃度はLSC と Rad7 ともに概ね近い値が得られていると考える。ラドン濃度 は、割れ目の密度や、透水性とは明確な相関が認められない(図 3.5.2-1)。この理由は、個々のモ ニタリング区間に、複数の水みちとなる割れ目が存在するためかもしれない。表 3.5.1-2 で示した水 の浸漬で得たラドンフラックス(4.3E×10⁻³ Bq/cm²)に基づいて、各区間の割れ目幅を算出した。こ の結果によれば、4 区間全体で 2.7~3.7×10⁻² cm の値が得られた。各区間の割れ目幅に大きな差が認 められない理由は、算出にはすべて同一のラドンフラックスを使用したためである。前述したように、 変質部でラジウム濃度が高い傾向があることなどから、原位置における実際のラドンフラックスは地 質性状で異なることが考えられる。このようなラドンフラックスの差異を反映できれば、より適用性 の高い割れ目幅の推定が可能と思われる。



図 3.5.2-1 室内のラドンフラックス測定と原位置ラドン濃度測定から算出した間隙幅

3.6 まとめ

多胡砂岩、藤枝砂岩、幌延泥岩を事例として堆積岩のラドンフラックスの評価について検討した。 ラドンの親核種であるラジウムの含有量から見ると、幌延泥岩>藤枝砂岩>多胡砂岩の順で大きい。 一方、バルクの間隙率を測定すると幌延泥岩>多胡砂岩>藤沢砂岩の順である。さらに、これらの岩 石をトリミングしてラドンフラックスを測定した場合は、方形試料の厚さあるいはコアの長さがそれ ぞれ 14cm の場合、幌延泥岩>藤枝砂岩>多胡砂岩の順となる。この結果からラジウムの含有量がラ ドンフラックスへ最も影響を与えていることを示している。多胡砂岩、藤沢砂岩、蛭川花崗岩の 10cm ×10cm の方形サンプルの厚さを変えてラドンフラックスを測定した場合、それぞれの岩石の厚みが 増すにつれフラックスも増大するものの、厚さに対するフラックスの増加率は、厚さが増すにつれて 小さくなる。この傾向は花崗岩>藤枝砂岩>多胡砂岩の順で顕著であり、間隙率が小さいほど、岩石 の厚みの影響は少ない可能性がある。言いかえれば、間隙率が大きい程、岩石の深部で発生したラド ンがフラックスに寄与していることを示している。例えば、幌延泥岩(コア試料)の側面をブチルゴ ムで覆い、側面からのラドンの発生を抑え、コア上下端面のみから発生するようにした場合、幌延泥 岩では軸方向で少なくとも 7cm の深さよりラドンが発生し、コア端面まで到達してフラックスへ影響 を与えている。以上の結果より、間隙率の大きい堆積岩のラドンフラックスを評価する際は、ラドン 発生の深度を考慮する必要があると考える。

原位置でのラドン濃度計測による割れ目の評価を予察的に実施した。深度 300m ボーリング横坑に 掘削されたボーリングコアを用いたラドンフラックスの測定と、ボーリン孔に設置したモニタリング 装置の水みち区間からの採水による、ラドン濃度計測によって割れ目の間隙幅を予察した。ラドンフ ラックスの測定では、エアタイト容器に空気を満たした場合、水で満たした場合の異なる状態で測定 を行った。その結果、水で浸漬した場合のラドンフラックスは空気の半分程度であった。これは空気 と水とではラドンの溶解度や拡散係数も異なることから、岩石内部で発生したラドンが岩石中を通過 する際に、間隙が水や空気とのどちらを媒介して岩石表面に到達するのかの違いと推定される。この 水で満たしたフラックスの値を用いてラドン濃度を計測したところ、計測を行った4区間全体で2.7 ~3.7×10⁻²cmの値が得られた。各区間の推定した割れ目幅に大きな差が認められない理由は、算出 した結果のすべてに同一のラドンフラックスを使用したためと考える。瑞浪コアの分析から変質して いるコアのラジウム含有量は新鮮な個所に比較して多い傾向もあることとから、原位置の岩石の変質 やラドンの溶解度に影響を与える温度を如何に反映して、より適用性の高い割れ目幅の推定が可能と するかが今後の課題である。
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.
- 木方建造、新孝一、大津正士、宮川公雄、鈴木浩一、岡田哲実、須永崇之、小早川弘亮、末永弘、井 ケ田徳行、山本真哉(2009) コントロールボーリングによる掘削・調査技術の開発(フェーズ 2) 電力中央研究所総合報告 N03
- 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 <u>https://gbank.gsj.jp/geostandards/</u>
- 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

4. 割れ目の可視化技術の開発

4.1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分において核種が漏えいした場合、その主な移行は地下水によって 行われ、母岩が結晶質岩の場合は割れ目が経路となる。したがって、核種の移行特性を把握・理解す るためには、経路となる割れ目の幾何学情報や地質学的特徴の取得が必要となる。一般に核種の移行 特性を把握・理解する場合、核種と類似する元素を用いたトレーサ試験が実施され、核種の遅延係数 や移行経路、平均間隙幅などが推定される。しかし、岩盤の持つ不均質性のため、得られるデータに は不確実なものが多く含まれる。この不確実性を低減するためには、異なる手段による結果の検証が 必要であり、本事業では、トレーサ技術の開発とともに、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として、溶存ラドン濃度計測技術、高粘性流体注入試験技術などが開発され、 スイスのグリムゼル試験場(GTS)で適用されてきた。さらに、上記の割れ目評価技術の有効性を検証 するために、原位置レジン注入試験も実施され、割れ目内レジン充填コアを物理的な擾乱なく回収し、 直接あるいは間接的に可視化することで割れ目の間隙分布や間隙幅を精度よく評価する試みも行って きた。その結果、トレーサ試験、高粘性流体注入試験、溶存ラドン濃度計測では相互に近い間隙幅が 得られた。トレーサ試験、高粘性流体注入試験、溶存ラドン濃度計測の割れ目開口幅の評価結果がモ デルに依存するため、より現実的なモデルへの改良と評価精度の向上の両立が今後の課題として残っ たが、レジン注入による割れ目間隙分布特性や間隙構造の評価が、この課題を解決しうる可能性があ ることが明らかになった。昨年度は、国外サイトの岩石コア以外に、割れ目可視化手法を試行的に国 内サイトの岩石コアに適用してみたが、国外サイトのものよりも割れ目の幅が非常に小さかったため、 それまで検討してきた方法の適用が困難なことが予想された。

そこで本年度は、昨年度室内レジン注入試験に供した幅の小さい割れ目を有する岩石コアに対して 同手法を適用し、割れ目間隙の可視化および幅の定量評価が可能か確認を行った。また、原位置レジ ン注入試験についての既往の研究事例を調査し、国内の地下研究施設で計画されている原位置レジン 注入試験を実施するための情報収集を行うとともに、開発すべき装置・方法についても検討を行った。

4.2 割れ目可視化手法の検討

4.2.1 概要

昨年度、瑞浪超深地層研究所の 12M130 号孔掘削時に得たボーリングコアから高角度の割れ目部分 (15.15~15.25mabh)を切り出したものを用いて室内レジン注入試験を実施した。その充填状況を医 療用X線CTスキャナにより観察した。さらに室内注入試験後の岩石コアを切断し、切断面を自然光下、 紫外線下で観察した。その結果、国内の地下研究施設で得た岩石の割れ目が国外サイトの岩石に比べ て幅が狭く、医療用 X線 CT スキャナでは精密に可視化することが困難であることが確認された。

そこで、本研究では、空間分解能に優れたマイクロフォーカス X 線 CT スキャナでの割れ目の可視 化を行うとともに、昨年度切断した 2 対の岩石コアに対して Grinding Tomography 法による割れ目の 可視化を行った。

4.2.2 X線CT法の概要

X線 CT は医療検査の分野で発展した技術であり、現在では非破壊検査技術として産業界でも広く用いられている。基本的に X線 CT は物体内部における X線の線減弱係数の分布、すなわち密度分布を評価する方法である。したがって岩石をはじめとした地盤材料への適用では、岩石内部の空隙構造や亀裂構造といった幾何学的特徴の評価、透水現象のような過渡現象の可視化と分析などに有効な非破壊検査技術として同手法を用いた研究が実施されている。近年は、高分解能での撮影が可能であるマイクロフォーカス X線 CT スキャナを利用した事例が多い。

(1) マイクロフォーカス X線 CT スキャナ

マイクロフォーカス X 線 CT スキャナは高い空間分解能で非破壊観察が可能な装置である。この 装置では、医療用 X 線 CT スキャナなどに比べて焦点寸法が非常に小さい X 線源を使用しているた め、ボケの少ない鮮明な画像を取得することが可能である。また、デジタルカメラの光学ズームと 同じように焦点距離 (FCD: focus-to-center distance)を変化させることで、試料内部の微細構 造を可視化することも可能である。図 4.2.2-1 に装置の概略図を示す。



図 4.2.2-1 マイクロフォーカス X線 CT スキャナの概略図

(2) アーチファクト

X線CTでは、ワークに存在しないものがアーチファクト(偽像)として画像内に現れる。以下、 代表的なアーチファクトを今回の撮影で得た画像を用いて例示する。また、用語については JIS B 7442:2013 に準拠した。

a. ビームハードニングアーチファクト (beam hardening artefact)

X線 CT 装置から出力される X線が連続 X線であるため、X線がワークを透過するときに低エネル ギーの X線がより多く減弱し、X線の実効エネルギーが高くなるビームハードニングと呼ばれる現 象が起こる。このビームハードニングによって引き起こされるアーチファクトは「ビームハードニ ングアーチファクト」と呼ばれ、図 4.2.2-2 に示すようにワークの外側ほど CT 値が大きな値とし て再構成される。画像中央付近に見られる縦に伸びた黒色の筋状のものは割れ目であり、実際はワ ークの両端まで分布している。しかし、このビームハードニングアーチファクトの影響を受け、端 の部分で割れ目が閉塞しているかのように表示されて実態と異なる様相を呈する。ビームハードニ ングを軽減するために、銅やアルミなどの金属フィルターを用いてワークを透過させる以前に低エ ネルギーの X線をカットする工夫や画像再構成時ソフトウェアを用いて補正する方法が取られるな ど行われているが、完全な解決には至っていない。



図4.2.2-2 ビームハードニングアーチファクトの事例

b. 端面アーチファクト (edge artefact)

端面アーチファクトは、主として角張った形状をしたワークの端部で発生するアーチファクトで あり、図 4.2.2-3 に示すように端部接線方向に直線上の影を生じる。端面アーチファクトは試料が 不定形であることが原因であるので、試料の密度と類似するもので覆い円柱形にするなどの工夫に より軽減することができる(土`山ほか、2000)。



図 4.2.2-3 端面アーチファクトの事例

c. リング状アーチファクト (ring artefact)

図 4.2.2-4 にリング状アーチファクトが生じた画像を例示する。リング状アーチファクトは、画像走査中心を中心とする同心円状のアーチファクトであり、X線検出素子の感度補正が不十分なときなどに強く現れる。撮影前の検出器キャリブレーション(ゲイン校正)を怠らないことがリング状アーチファクト軽減の第一歩であり、ワークのサイズや撮影条件を見直すことでも大幅に軽減させることが可能である。画像中心部ほど強く現れるのが特徴であるが、例示した画像のように中心部ではない箇所でも強く現れることがある。



図 4.2.2-4 リング状アーチファクトの事例

d. メタルアーチファクト (metal artefact)

金属などの X 線減弱係数の大きい物質の存在によって発生するアーチファクトである。X 線のエ

ネルギーが低い場合に顕著であり金属部分から放射状にノイズが発生する。図 4.2.2-5 にメタルア ーチファクトが生じた画像を例示する。岩石中には鉄を成分とした鉱物が含まれるため、その箇所 でメタルアーチファクトを生じる。補正方法が種々提案されているが、完全な解決には至っていな い。X線の出力を上げること(X線を透過させやすくする)により軽減できる可能性もある。



図 4.2.2-5 メタルアーチファクトの事例

e. ミスアライメントアーチファクト (misalignment artefact)

図 4.2.2-6 にミスアライメントアーチファクトを生じた画像を例示する。ワークの境界部で半影 (ボケ)が生じていることが確認できる。例示した画像は2回に分けて撮影を実施しており、試料 の上部と中央部に半影が生じている。ミスアライメントアーチファクトは測定装置の幾何配置と画 像再構成時の想定幾何配置との差によって発生するものであり、多くの場合、撮影前の回転中心校 正の不備によって生じる。また、マイクロフォーカス X 線 CT はスキャン時に試料台 (回転テーブ ル)が回転するため、回転テーブルの振動 (剛性の低い回転テーブルを使用した場合)に伴うモー ションアーチファクトが生じてしまう可能性がある。このモーションアーチファクトもミスアライ メントアーチファクトと似たアーチファクトが画像上に生じる。このアーチファクトは微細構造の 画像評価に大きな影響を及ぼすので、ワークを適切に固定すること、回転テーブルのメンテナンス を心がけるなどに注意を払うべきである。



図 4.2.2-6 ミスアライメントアーチファクトの事例

4.2.3 Grinding Tomography 法の概要

Grinding Tomography 法は、Serial Sectioning 法とも呼ばれ、表面研磨(研削)と表面観察を繰 り返して得られる断面画像から3次元画像を再構築する手法である。これまで、様々な分野で同手法 を適用した研究が実施されている。とくに材料分野では、結晶の並進対称性からでは3次元微細構造 を理解できない材料が増えてきたこと、またこのような材料の構造解析の必要性が増したことにより、 Serial Sectioning 法による3次元微細構造解析技術が改めて注目されている(波多 2012)。また、 加工(研磨、研削)と観察の自動化が進み、mm~nm オーダーの3次元材料組織解析を比較的簡便に行 えるようになったこと(物質・材料研究機構 2011)も同手法が改めて注目された理由であると考えら れる。

同手法を岩石に適用した事例としては、安藤らの岩石組織の3次元観察の試み(安藤ほか 1995)、清水らによる岩石内部の亀裂の可視化(清水ほか 1995)、鐵らの岩体亀裂の形状に関する研究(鐵ほか 2005; 鐵ほか 2008; 鐵ほか 2010)、Maloof らによる石灰岩中の原始動物化石の観察(Maloof et al.

2010) などがあげられる。

安藤らは、飛騨変成帯神岡町東漆山に産出する複合岩脈の組織を三次元観察するために、6 x 10 x 12 cm の直方体に成形した岩石試料に対して、0.5 mm 間隔での研磨とイメージスキャナによる撮影を 240 回繰り返して連続断面画像データを取得している。取得した連続断面画像を三次元可視化ソフト で三次元ボリュームデータに再構築して複合岩脈の形成過程について論じている。

清水らは、三軸圧縮応力下におかれた稲田花崗岩(直径 30 mm、高さ 60 mm)に赤色顔料で着色し た樹脂(シアノアクリレート)を注入し、固化後に回転型断面研磨機を用いて 0.5 mm 間隔の研磨と CCD カメラによる撮影を 98 回繰り返して連続断面画像データを取得している。取得した連続断面画像 データから作成した MPR 画像からせん断破壊で生じた亀裂の分布を観察し、本手法が岩石の破壊過程 における流れ場の変化を理解する上で有用なツールとなる可能性があることを論じている。

鐵らは、釜石原位置試験場で採取した天然の単一亀裂を有する 50 cm スケールの花崗岩のブロック試 料表面の研削を繰り返し、内部にある亀裂を撮影、観察している。取得した画像から亀裂形状データ を作成し、平均亀裂幅、亀裂面の粗度、亀裂幅の空間的相関性など、50 cm スケール天然岩石亀裂の 特徴を表す平均的なパラメータを評価している。また、評価されたパラメータから亀裂の透水異方性 についても論じている。

Maloof らプリンストン大学の研究チームは、オーストラリア南部の約6億3500万年前のトレゾナ 層から採取した石灰岩を約50µm間隔で研削・撮影し、それらの画像をもとに3次元画像を作成し、 海綿に似た原始動物の化石の抽出に成功している。X線CT法では石灰岩中の化石を識別することが困 難であり、Maloof らの研究はGrinding Tomography 法の有用性を証明する研究事例の一つとして挙げ られる。なお、彼らが使用している装置は平面研削盤と高精細デジタルカメラ(8000万画素)を組み 合わせたものであり、研削と観察が自動で行える(GIRI 2013)。

Grinding Tomography 法は加工に多大な労力がかかること、一般に可視化技術が未発達であったことなどから同手法の適用は敬遠されてきたが、前述したように加工・撮影を自動で行える装置が開発され、従来の認識が変わりつつある。今後の発展が期待される。

4.2.4 撮影に用いた岩石コアと撮影条件

撮影に用いた岩石コア

撮影には、昨年度割れ目に 200 ppm のフルオレセインナトリウムを添加させたレジンを充填させ た岩石コアを用いた。この岩石コアは JAEA の瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑で掘 削された 12MI30 号孔のボーリングコア (15.00mabh~16.00mabh) から高角度の割れ目を含む領域 (15.15mabh~15.25mabh)をカットし、直径約 70mm×長さ約 100mm に成形したものである。また、 昨年度までに図 4.2.4-1 に示す黄色の破線部で岩石コアを切断し、切断面上でレジンの充填状況を

- 4-7 -

確認している(図4.2.4-2)。本年度は、この切断された2対の岩石コアを撮影対象とした。以下、 一方を12MI30-U、もう一方を12MI30-Lと呼ぶこととする。座標系はボーリング掘削方向をz軸と して図4.2.4-3のように設定した。なお、医療用X線CTスキャナでの撮影と研削面の撮影は両岩 石コア(12MI30-U、12MI30-L)に対して実施し、マイクローカスX線CTスキャナによる撮影は 12MI30-Uに対してのみ実施した。



図 4.2.4-1 撮影に用いた岩石コア



図 4.2.4-2 切断直後の岩石コア



図 4.2.4-3 岩石コアの座標系

(2) X線CT画像の撮影条件

医療用 X 線 CT 画像の取得には電力中央研究所が所有する医療用 X 線 CT スキャナ(Aquilion64、 東芝メディカルシステムズ株式会社)を用いた。撮影条件は、管電圧 135 kV、管電流 350 mA、ス ライス厚 0.5 mm、照射時間 1 秒/回転である。再構成関数 FC30 を使用し、再構成スライス間隔 0.5 mm で画像を再構成した。出力される画像の画素数は 512 x 512 pixel である。

マイクロフォーカス X 線 CT 画像の取得には、東京都立産業技術開発研究センターが所有する東 芝 IT コントロールシステム(株)製の TOSCANER-32251 μ hd を用いた。TOSCANER-32251 μ hd では、 1回のスキャンで最大 1024 枚の画像(3 次元画像)を収集すること(コーンビームスキャン)が可 能である。出力される画像の画素数は 512 x 512 pixel、1024 x 1024 pixel、2048 x 2048 pixel から選択可能である。ただし、コーンビームスキャンの際は、2048 x 2048 pixel は選択できない。 撮影条件は、管電圧 150 kV、管電流 350 μ A、ビュー数 2000、積算枚数 20 枚、スロープ値 50、検 出器視野 6 インチである。また、X 線源には 0.6 mm 厚の銅フィルターを取り付けて、ビームハード ニングアーチファクトの原因となる低エネルギーの X 線を可能な限りカットして撮影を実施した。

マイクロフォーカス X線 CT スキャナの利点を活用するために、2 つの撮影領域で撮影を行った。 図 4.2.4-4 にその概念図を示す。一つは岩石コア全体が収まるものであり、もう一つは、割れ目領 域を高分解能で撮影するために撮影領域を狭めたものである。実際の条件は表 4.2.4-1 のとおりで ある。Case1 は岩石コア全体が収まる条件であり、Case2 および Case3 は割れ目領域を高分解能で 撮影した条件である。Case1 については1回のコーンビームスキャンで岩石コア全体を撮影するこ とができなかったため、2回に分けて撮影を実施した。また、Case2 および Case3 については岩石 コア全体を撮影しておらず、図 4.2.4-5 に示すとおり、Case2 では岩石コアの中央部付近の 24 mm の領域を、Case3 ではそこからさらに 24 mm の領域を撮影した。表中の DFOV およびスライス厚から Case1 のボクセルサイズは 0.079 x 0.079 x 0.129 mm、Case2 のボクセルサイズは 0.033 x 0.033 x 0.218 mm、Case3 のボクセルサイズは 0.033 x 0.033 x 0.054 mm である。また、表中の再構成ピッ チとは z 軸方向の間隔であり、今回はスライス厚の約 1/2 とした(オーバーラップ撮影)。なお、 撮影前に実施する必要があるゲイン校正、回転中心校正等のスキャン校正は実施していない。



図 4.2.4-4 撮影領域の設定

	FCD mm	FDD mm	DFOV mm	スライス厚 mm	再構成ピッチ mm	枚数
Case1	712.5	1000	80.896	0.129	0.064	1660 (830@2)
Case2	300	1000	33. 792	0.218	0.108	221
Case3	300	1000	33. 792	0.054	0.027	888

表 4.2.4-1 マイクロフォーカス X 線 CT での撮影条件



図 4.2.4-5 拡大撮影の位置(高さ)

(3) 研削面画像の撮影方法・条件

研削面画像は、図 4.2.4-6 に示すように平面研削盤とカメラスタンドに固定したデジタルカメラ を用いて、岩石コアを一定の間隔(1 mm)で平面に研削し、その断面をデジタルカメラでの撮影を 繰り返すことにより取得した。

デジタルカメラは、デジタルー眼レフカメラ(D7000、株式会社ニコン)を用いた。レンズは焦 点距離 40mm のマクロレンズ(AF-S DX Micro NIKKOR 40mm f/2.86、株式会社ニコン)を用いた。 また、レンズには 410nm 以下の紫外線を吸収する UV カットフィルター(Zeta UV L41、株式会社ケ ンコー・トキナー)を取付けている。平面研削盤とデジタルカメラが一体になった装置を用いるこ とが位置合わせの点から望ましいが、平面研削盤を長期間専有できないことなどから、研削と撮影 は別々の場所で行っている。このことからカメラスタンド上にはマグネットベースをL字に配置し、 撮影のたびに岩石コアが同じ位置にくるように努めた。

非磁性体である岩石を研削盤のマグネットチャックに固定するために、岩石コアの切断面に 200mm×150mm×5.70mmの鉄板(SPHC、6mm厚、公差±0.3mm)を鉄板に接着させた。岩石と鉄板との 接着には、12MI30-U はエポキシ樹脂系接着剤(ボンドクイックメンダー、コニシ株式会社)を、 12MI30-L はエポキシ樹脂系接着剤(ボンドE セット、コニシ株式会社)を用いた。ボンドE セット は 90 分硬化開始のエポキシ樹脂系接着剤であり、5 分硬化開始のボンドクイックメンダーより接着 力や耐水性に優れているが、紫外線を照射させると淡青色に蛍光する。今回の検討では、研削時に 岩石コアが鉄板から剥がれる不安が拭えなかったため、ボンドE セットのデメリットを認識しつつ も、一方の岩石コアでは紫外線により蛍光するボンドE セットを使用した。

撮影は蛍光灯、紫外線、蛍光灯+紫外線の3つの異なる光源下で実施した。表4.2.4-2 に撮影条件を示す。また、12MI30-U では研削前の画像を含めて35枚(研削深さ0 mm~34 mm)、12MI30-L では研削前の画像を含めて32枚(研削深さ0 mm~31 mm)の画像を取得した。なお、より詳細な研削の手順や撮影方法については昨年度の報告書(電力中央研究所2013)を参照されたい。



図 4.2.4-6 研削面画像取得のための装置

絞り値 (F 値)	f/5.6		
ISO 感度	100		
シャッタースピード	蛍光灯光源下:1/15秒		
	紫外線光源下:1秒		
	蛍光灯+紫外線光源下:2秒		
測光モード	マルチパターン測光		
ピント合わせ	マニュアル		
記録画素数	4928×3264 ピクセル		
画像解像度	43pixel/mm(23μm/pixel) ※カメラと研削面間固定		

表 4.2.4-2 撮影条件

4.2.5 撮影結果

(1) 医療用 X 線 CT 画像

異なる表示視野(DFOV)で撮影した医療用 X 線 CT 画像を図 4.2.5-1 に例示する。上段が DFOV 約 80 mm の画像で、下段が DFOV 約 45 mm の画像である。それぞれ画像の右側に黄色の四角で囲った領域を単純拡大させたものを示している。DFOV 約 45 mm の画像のほうが、黄色の四角で囲った領域を構成する画素数が増えるため境界部分が滑らかに表示され、階段上のギザギザ(ジャギー)が軽減されていることが分かる。このように境界部分が滑らかに表示される利点はあるが、両画像に空間分解能の店で大きな差はなく、もう一方の岩石コアとの合成も考慮して、医療用 X 線 CT 画像での検討では、DFOV 約 80 mm で撮影した画像のみを解析することとした。



図 4.2.5-1 異なる表示視野で撮影した医療用 X 線 CT 画像 (WL:2500、WW:3000)

図4.2.5-2に12MI30-Uの画像、図4.2.5-3に12MI30-Lの画像、および両者が切断前に円柱状で あったと仮定して合成した画像を図4.2.5-4に示す。すべての画像は同じしきい値(WL:2500、 WW:3000)で表示している。高密度および平均原子番号の高い物質が白く表示され、割れ目のよう に密度の低いものは黒く表示されている。12MI30-Uの画像と12MI30-Lの画像を比較すると、 12MI30-Lの方が比較的割れ目の連続性が良いことが確認できる。なお、これらの画像は、後述の画 像解析のために画像の傾きや位置を修正している。



図 4.2.5-2 医療用 X 線 CT 画像 (xy-断面、12MI30-U)

(WL:2500, WW:3000)



図 4.2.5-3 医療用 X 線 CT 画像 (xy-断面、12MI30-L) (WL:2500、WW:3000)



図 4.2.5-4 医療用 X 線 CT 画像 (xy-断面、12MI30-U + 12MI30-L) (WL:2500、WW:3000)

撮影で得られた画像の中で特徴的な箇所を例示する。図 4.2.5-5 から割れ目が単純な単一割れ目 ではなく分岐していること、鉱物脈や割れ目充填鉱物と思われるものが存在すること、割れ目幅が 膨縮している様子などが確認できる。



図 4.2.5-5 割れ目の特徴(xy-断面、医療用 X 線 CT 画像) (WL:2500、WW:3000)

次に、割れ目が閉塞している箇所の一部を図 4.2.5-6 に示す。X 線 CT 画像では、画像の最小要素 である1ボクセル(ここでは、0.156 x 0.156 x 0.5 mm)のデジタル値(CT 値)が、ボクセル内に ある様々な物質の線減弱係数の平均値として出力されている(部分体積効果)。ボクセル内で岩石 領域の割合が大半を閉めれば、その箇所は岩石として出力され、逆に割れ目領域の割合が増えると 装置の空間分解能以下の幅であっても割れ目として視認できることもある。したがって、割れ目が 閉塞(接触)した位置を三次元的に同定するには、より空間分解能が高い装置で撮影する必要があ るものと考えられる。



図 4.2.5-6 割れ目の閉塞箇所(xy-断面、医療用 X 線 CT 画像) (WL:2500、WW:3000)

次に、割れ目を横切る粒状の高密度領域(黒雲母)の存在が確認できた箇所の一部を図 4.2.5-7 に示す。割れ目は、黒雲母内を通過あるいは黒雲母の境界沿いを進展しているものと考えられるが、 前述の部分体積効果により割れ目の進展が黒雲母により遮られているかのように表示されている。 これも割れ目の閉塞と同様により空間分解能の高い装置で撮影することで、割れ目の進展経路を可 視化できる可能性があるものと考えられる。



図 4.2.5-7 割れ目を横切る黒雲母(xy-断面、医療用 X 線 CT 画像)

(WL:2500, WW:3000)

xy-断面画像から MPR (Multi Planar Reconstruction) 画像を作成した。図 4.2.5-8 は xz-断面、 図 4.2.5-9 は yz-断面である。

xz-断面から、xy-断面と同様に割れ目が分岐している様子が確認できる。また視認し辛いが、割 れ目を横切るL字状の長石と思われるものの存在(淡灰色)も確認することができる。CT値は密度 だけではなく平均原子番号にも依存する。照射したX線エネルギーによっては、このように原子番 号の高い元素に富んだ鉱物を可視化することが可能である。なお、L字状のものはカリウムに富ん だカリ長石であると思われる。



図 4.2.5-8 割れ目に直交な断面(xz-断面、医療用 X 線 CT 画像) (WL:2500、WW:3000)

yz-断面は、割れ目に対してほぼ水平にスライスした断面である。部分体積効果により割れ目幅 が大きいほど黒く表示され、幅が小さくなるに従って岩石領域の割合が増えるため、その箇所は淡 灰色へと変化していく。また、右側の画像からは割れ目生成過程に生じた破砕領域と思われるもの の存在も確認することができる。yz-断面はその他の断面に比べて割れ目の形状などを明瞭に可視 化することができないが、割れ目の3次元可視化でのしきい値設定や割れ目の接触面積の推定にお いて、重要な役割を果たす。詳細については後述する。



図 4.2.5-9 割れ目に水平な断面 (yz-断面、医療用 X 線 CT 画像) (WL:1500、WW: 3000)

(2) マイクロフォーカス X 線 CT 画像

表示視野(DFOV) 80.896 mm で撮影した Case1 の画像を図 4.2.5-10 に示す。これらの画像は、切 断面が水平になるように画像の傾きや位置を修正している。全ての画像からビームハードニング現 象によって外周部の CT 値が高く表示されていることやリング状の偽像(リングアーチファクト) が画像上に現れていることが確認できる。また、5 mm、55 mm の画像は、前述したミスアライメン トアーチファクトの影響を受けて鮮明さが失われていることも確認できる。

図 4.2.5-11 にマイクロフォーカス X 線 CT 画像から読み取れる割れ目の特徴を示す。医療用 X 線 CT 画像でも確認された z ≒ 3 mm と 54 mm に位置する割れ目の分岐は、ミスアライメントアーチフ アクトの影響を受けて明瞭なものではないが、割れ目が分岐している様子が確認できる。割れ目を 横切る黒雲母が、割れ目を遮る形で存在せず、黒雲母を分断し割れ目の経路として存在することが 確認できる。これは画像を構成するボクセルのサイズが医療用のものに比べて小さいため、部分体 積効果の影響を受けにくかったためであると考えられる。

次に、図 4.2.5-12 に医療用 X 線 CT 画像で確認された閉塞箇所(ほぼ同じ位置)を示す。当該箇 所が医療用 X 線 CT 画像とは異なり、非常に小さな割れ目幅で岩石コアの外に連続して分布してい ることを確認することができる。



図 4.2.5-10 マイクロフォーカス X 線 CT 画像 (xy-断面、DFOV:80.896 mm)

(WL:90、WW:100)



図 4.2.5-11 割れ目の特徴 (xy-断面、マイクロフォーカス X 線 CT 画像) (WL:90、WW:100)



図 4.2.5-12 割れ目の閉塞箇所(xy-断面、マイクロフォーカス X 線 CT 画像)

(WL:90、WW:100)

xy-断面画像から MPR (Multi Planar Reconstruction) 画像を作成した。その結果を図 4.2.5-12 および図 4.2.5-14 に示す。図 4.2.5-13 は xz-断面、図 4.2.5-14 は yz-断面である。

xz-断面からは、割れ目の上下・中央部で分岐している様子が確認できる。しかし上部、中央部の割れ目の分岐は、ミスアライメントアーチファクトの影響を受けて鮮明に可視化できていない。 ただし、撮影前の校正を適切に行えば、この箇所の割れ目の形状も鮮明に可視化できるものと思われる。 医療用 X 線 CT 画像で見られた L 字状の長石と思われるものは、マイクロフォーカス X 線 CT 画像からは確認できなかった。

yz-断面は割れ目に対してほぼ水平にスライスした断面である。部分体積効果により割れ目幅が 大きいほど黒く表示され、幅が小さくなるに従って岩石領域の割合が増えるため、その箇所は淡灰 色へと変化していく。図 4.2.5-14 の左側の画像からは、割れ目にトラップされた気泡の存在(丸 状の黒色)とその形状を確認することができた。



図 4.2.5-13 割れ目に直交な断面 (xz-断面、マイクロフォーカス X 線 CT 画像、Casel) (WL:90、WW:100)



図 4.2.5-14 割れ目に水平な断面 (yz-断面、マイクロフォーカス X 線 CT 画像、Case1) (WL:60、WW:100)

割れ目領域を高分解能で撮影するために撮影領域を狭めた拡大撮影を行った。撮影した高さについては図 4.2.4-5 に示したとおりであり、xy-断面上での拡大撮影範囲は図 4.2.5-15 のとおりである。なお、表示視野 (DFOV) は 33.792 mm である。図 4.2.5-16 および図 4.2.5-17 に拡大撮影した結果を示す。



図 4.2.5-15 拡大撮影した範囲

図 4.2.5-16 は z = 41 mm~65 mm の位置を拡大撮影した Case2 の画像であり、図 4.2.5-17 は z = 65 mm~89 mm の位置を拡大撮影した Case3 の画像である。これまでの画像とは異なり、割れ目の形 状や黒雲母等の鉱物の形状が読み取れるほど鮮明に可視化できていることが分かる。また、鉱物脈 と思われるもの(白色の筋状の部分)が分岐した割れ目に繋がる形で存在している様子も確認でき る。さらに Case3 の画像では、幅の狭い割れ目沿いに白色の筋状のものも確認できる。ビームハー ドニングアーチファクトについては、図 4.2.5-15 にからも分かるように、岩石コア切断面である 直線部に認められる。それ以外の領域では、その領域に到達する前に X 線が減弱して高エネルギー の X 線に変化したために、ビームハードニングアーチファクトが顕著に現れなかったものと考えら れる。



図 4.2.5-16 拡大撮影で得たマイクロフォーカス X 線 CT 画像 (Case2)

(WL:50, WW : 100)



図 4.2.5-17 拡大撮影で得たマイクロフォーカス X 線 CT 画像 (Case3) (WL:50、WW:100)

xy-断面画像から MPR (Multi Planar Reconstruction) 画像を作成した。図 4.2.5-18 (Case2) および図 4.2.5-20 (Case3) は xz-断面、図 4.2.5-19 (Case2) および図 4.2.5-21 (Case3) は yz-断面である。

Case2の xz-断面からは、xy-断面で確認された鉱物脈と思われるものが z 軸方向にも分布していることが確認できる。また、Case2、Case3の xz-断面のどちらからも割れ面が接触している様子が鮮明に可視化できていることが確認できる。

yz-断面では、これまでの画像とは異なり、割れ目の形状までもが映しだされていることが確認 できる。所々に見られる丸状の黒色は気泡である。



図 4.2.5-18 割れ目に直交な断面 (xz-断面、マイクロフォーカス X 線 CT 画像、Case2) (WL:50、WW:100)



図 4.2.5-19 割れ目に水平な断面 (yz-断面、マイクロフォーカス X 線 CT 画像、Case2) (WL:20、WW:100)



図 4.2.5-20 割れ目に直交な断面 (xz-断面、マイクロフォーカス X 線 CT 画像、Case3) (WL:50、WW:100)



図 4.2.5-21 割れ目に水平な断面 (yz-断面、マイクロフォーカス X 線 CT 画像、Case3) (WL:20、WW:100)

(3) 研削面画像

平面研削と研削面の撮影の繰り返しで得られた画像を図 4.2.5-22~図 4.2.5-24 に示す。図 4.2.5-22 は蛍光灯光源下で撮影した画像、図 4.2.5-23 は蛍光灯と紫外線を同時に照射して撮影し た画像、図 4.2.5-24 は紫外線光原下での画像である。なお、昨年度の室内レジン注入試験では、 それぞれの画像の右手から蛍光剤を添加したレジンを注入している。また、レジン注入前に割れ目 内を満たしていた液体はヨウ化ナトリウム水溶液であり、このヨウ化ナトリウム水溶液がレジンに 添加した蛍光剤を分離させることを確認している。以下に示す画像では、その影響を受けて、画像 の右手に位置する箇所では割れ目以外も蛍光している。

図 4.2.5-22(a)は 12MI30-U の研削深さ 19 mm の蛍光灯光源下での画像、(b)は 12MI30-L の研削深 さ 24 mm の蛍光灯光源下での画像である。蛍光灯に含まれる微量の紫外線に反応し緑色あるいは黄 色を呈している箇所が割れ目である。画像中の黒色の箇所の大半が黒雲母、淡灰色の箇所が石英、 白色の箇所が長石である。白色の箇所で淡褐色を帯びた箇所が確認できるが、これはカリ長石であ ると思われる。

図 4.2.5-23(a)は 12MI30-U の研削深さ 19 mm の蛍光灯+紫外線光源下での画像、(b)は 12MI30-L の研削深さ 24 mm の蛍光灯+紫外線光源下での画像である。割れ目の箇所が紫外線照射により鮮や かな緑色(黄色)で蛍光している。黒色の箇所は蛍光灯光源下と同じく大半が黒雲母であり、黒み が増し濃緑色を呈している箇所が石英である。白色の箇所(とくにカリ長石と思われる箇所)はよ り褐色が増しており、一部は淡青色に自家蛍光している。

図 4.2.5-24(a)は 12MI30-U の研削深さ 19 mm の紫外線光源下での画像、(b)は 12MI30-L の研削深 さ 24 mm の紫外線光源下での画像である。割れ目以外の箇所のほとんどが黒色を呈しており、割れ 目が鮮明に可視化できていることが確認できる。ただし、割れ目近傍も発光している。この発光は

- 4-29 -

石英のような透明度の高い鉱物が光を通しやすいため、石英全体が淡く発光したことが主たる原因 であると考えられる。本研究ではその他の要因もあるが、それついては後述する。



(a) 12MI30-U (研削深さ19 mm)

(b) 12MI30-L (研削深さ24 mm)

図 4.2.5-22 蛍光灯光源下での画像例



(a) 12MI30-U (研削深さ19 mm)

(b) 12MI30-L (研削深さ24 mm)

図 4.2.5-23 蛍光灯+紫外線光源下での画像例



(a) 12MI30-U (研削深さ19 mm)

(b) 12MI30-L (研削深さ 24 mm)

図 4.2.5-24 紫外線光源下での画像例

研削面を詳細に観察した。詳細観察した箇所を示したものを図 4.2.5-25 および図 4.2.5-26 に示 す。詳細観察の結果を図 4.2.5-27~図 4.2.5-34 に示す。なお、図 4.2.5-27~図 4.2.5-30 は 12MI30-U の研削面画を詳細観察したものであり、図 4.2.5-31~図 4.2.5-34 は 12MI30-L の研削面を詳細観察 したものである。



図 4.2.5-25 詳細観察の位置 (12MI30-U)



図 4.2.5-26 詳細観察の位置 (12MI30-L)

図 4.2.5-27 は、研削深さ 19 mm に位置し長石粒子内を通過する割れ目である。左の蛍光灯画像 から割れ目内に物質が充填していることが分かる。中央の蛍光灯+紫外線画像からは割れ目が枝分 かれしており、長石粒子とともに自家蛍光している。自家蛍光の様子から長石が累帯構造を形成し ていることが確認できる。このことからこの長石は斜長石であると思われる。

図 4.2.5-28 は、研削深さ 31 mm に位置しカリ長石粒子内を通過する割れ目である。2 つのカリ長 石粒子がL字状に重なって存在することが分かる。割れ目が両カリ長石の短軸方向に沿って通過し ているように見える。また、画像の右側では割れ目が分岐しており、上側の割れ目にはレジンが未 充填であることが確認できる。中央の蛍光灯+紫外線画像からは研削面が水で濡れており、そのた め紫外線での蛍光が散乱している様子も確認できる。

図 4.2.5-29 は研削深さ 31 mm に位置する割れ目である。膨縮構造をした割れ目の存在を確認で き、その割れ目内に気泡が閉じ込められていることも確認できる。また、左側の割れ目内には図 4.2.5-27 で観察された割れ目と同様に物質が充填している様子も確認できる。

図 4.2.5-30 は、研削深さ 10 mm に位置し、研削面上で中央に位置する割れ目である。開口して はいるもののその幅は非常に小さい。研削面上で中央に位置する割れ目は、このように幅の小さな 割れ目であるか、割れ目内に物質が充填されているものがほとんどであった。

図 4.2.5-31 は、研削面深さ 30 mm に位置し膨縮構造をした割れ目である。中央及び右側の画像の下側に青色の箇所が確認できるが、これは、岩石と鉄板との接着に使用したエポキシ樹脂系接着 剤が紫外線により蛍光したことによるものである。なお、青色の箇所の鉱物は透明度の高い石英で ある。

図 4.2.5-32 は、研削面深さ 30 mm に位置し長石粒子内を通過する割れ目である。右側の蛍光灯 光源下の画像から、割れ目内には物質が充填されていることが確認できる。割れ目内に物質が充填 されていることから図 4.2.5-27 と同様に斜長石である可能性が高い。この長石粒子内へレジンが 浸潤しているように見えるが、実際に浸潤しているかは不明である。

図 4.2.5-33 は、研削面深さ 22 mm に位置する割れ目である。12MI30-L の研削面で比較的よく観察される割れ目であり、12MI30-U に比べると 12MI30-L の割れ目は連続性が良いようである。

図 4.2.5-34 は、研削面深さ 21 mm に位置する割れ目である。また、研削面の左端に位置し室内 レジン注入試験での注入側の割れ目である。レジンに添加した蛍光剤が周辺にも分布しており、研 削時に割れ目内のレジンから分離した可能性が高い。ただし、室内レジン注入試験時にレジンから 分離した蛍光剤を含むレジンよりも粘性の低い流体が岩石基質部を浸潤したことも考えられが、詳 細は不明である。

以上、研削面で特徴的な割れ目を詳細に観察した。割れ目の多くは鉱物粒子内を通過しており、 斜長石と思われる鉱物内の割れ目には充填物質の存在が多く確認された。また、その箇所の紫外線

- 4-32 -

蛍光画像から、レジン(あるいはレジンから分離したレジンより粘性の低いなにか)が浸透してい る様子が観察された。充填物質自身も紫外線により蛍光していたので断定はできないが、マイクロ フォーカス X線 CT 画像の結果と考え合わせると、割れ目内に物質が充填されていてもその隙間な どから流体が浸透し、水みちとして機能するものと思われる。蛍光法による割れ目の可視化は、蛍 光灯光源下(自然光)では識別が難しい割れ目を抽出することができるが、割れ目幅を測定する上 では、割れ目と岩石との境界が分離しづらくなることから蛍光灯光源下との組み合わせで幅を計測 することが望ましいものと思われる。ただし、研削面を水で湿らせすぎたことが割れ目と岩石との 境界を抽出しづらくしている原因でもあるので、撮影時には、研削面を湿らせすぎないよう注意さ れたい。自家蛍光した鉱物の同定は顕微鏡観察などで確かめる必要がある。あるいは、既知の鉱物 を含む岩石コアを同手法で観察して確認する方法もある。この点については今後の課題としたい。



図 4.2.5-27 詳細観察画像 1 (12MI30-U)



図 4.2.5-28 詳細観察画像 2 (12MI30-U)



図 4.2.5-29 詳細観察画像 3 (12MI30-U)



図 4.2.5-30 詳細観察画像 4 (12MI30-U)



図 4.2.5-31 詳細観察画像 5 (12MI30-L)



図 4.2.5-32 詳細観察画像 6 (12MI30-L)



図 4.2.5-33 詳細観察画像 7 (12MI30-L)



図 4.2.5-34 詳細観察画像 8 (12MI30-L)

研削面画像から作成した MPR 画像を図 4.2.5-35~図 4.2.5-40 に示す。図 4.2.5-35~図 4.2.5-37 は 12MI30-U の画像であり、図 4.2.5-38~図 4.2.5-40 は 12MI30-L の画像である。それぞれ順に、 蛍光灯光源下、蛍光灯+紫外線光源下、紫外線光源下の画像である。中央に配置した画像が研削断 面画像であり、右および下に配置された画像が中央の画像に付記した黄色の線上の断面画像である。 1 mm 間隔の研削面画像を重ね合わせて作成したため、割れ目と岩石基質部との境界などにジャギー

(階段状のギザギザ)が目立つ。現状の簡易的な撮影システムでは、1mm 間隔以下の精度で画像を 取得することができないが、X線 CT 画像からは可視化が難しい鉱物と割れ目の関係、例えば長石粒 子内部を進展する割れ目(粒内クラック)の様子が、蛍光灯光源下、および蛍光灯+紫外線光源下 の MPR 画像で可視化できており、研削精度と撮影精度を向上させればより多くの知見が得られるも のと考えられる。この点に関しては今後の課題としたい。


図 4.2.5-35 蛍光灯光源下での研削面画像から作成した MPR 画像(12MI30-U)



図 4.2.5-36 蛍光灯+紫外線光源下での研削面画像から作成した MPR 画像(12MI30-U)



図 4.2.5-37 紫外線光源下での研削面画像から作成した MPR 画像(12MI30-U)



図 4.2.5-38 蛍光灯光源下での研削面画像から作成した MPR 画像(12MI30-L)



図 4.2.5-39 蛍光灯+紫外線光源下での研削面画像から作成した MPR 画像(12MI30-L)



図 4.2.5-40 紫外線光源下での研削面画像から作成した MPR 画像(12MI30-L)

4.2.6 画像解析方法·結果

(1) リングアーチファクト補正

リングアーチファクトを補正する方法は種々提案されている。その中で最も簡単な方法として Ketcham らが提案する極座標変換とフーリエ変換を利用したものがある(Ketcham and Carlson 2001)。 この手法の手順を図 4.2.6-1 に示す。まず、はじめに画像データの極座標変換を行う。そうするこ とでリング状に分布していた偽像が極座標変後には縦に分布するようになる。続いてこの画像をフ ーリエ変換しパワースペクトルを得ると、極座標変換後の画像で見られた縦に伸びた偽像がパワー スペクトル上の水平方向に白い筋として表示される。この水平方向の白い筋を適当な範囲でマスク 処理を施し、逆フーリエ変換、座標変換とはじめと逆の処理を行うことで、リングアーチファクト を補正できる流れである。その結果は、修正画像と原画像を見比べると分かるように、リングアー チファクトの影響が軽減されている。ただしこの方法は、パワースペクトルのマスク処理の範囲が 中央に及ぶほど、画像は平滑化されたボケた画像になるため、マスク処理の程度によっては、割れ 目の情報を失う可能性がある。したがって、今回はメディアンフィルタである程度リングアーチフ ァクトを除去できたこと、処理に手間がかかることなどからこの手法を採用しなかった。また、リ ングアーチファクトは撮影前の検出器の校正や撮影条件によりある程度は軽減できることが分か っているので、リングアーチファクトを補正する画像処理を考える前に検出器の校正や撮影条件を 見直すことを先に検討することが望ましい。

図 4.2.6-1 リングアーチファクトの補正手順

(2) ビームハードニングの補正

ビームハードニングの補正方法として、CT 画像に発生するビームハードニング効果を理論的に求 めて補正する方法(中島ら 2000) や、供試体中心からの水平距離とCT 値との関係を求め、この関 係を回帰曲線で近似して光線硬化シミュレーション画像を作成し、その画像を原画像から差し引く 方法(中島ら 2010) などが提案されている。理論的な手法は、対象となる物体の密度と化学組成 が必要であることから、とくに複雑な化学組成を有する物体に対しては適用が困難である。また、 中島らが提案する光線硬化シミュレーション画像は、円柱状の物体であれば作成が容易であるが、 本研究のように円柱状でない場合は適用が難しい。

本研究でも光線効果シミュレーション画像を作成してビームハードニングの補正を行ったが、任 意の形状にも適用できる方法を採用した。具体的には、複数枚の画像を用いて、それらの画像の z 軸方向の中央値(あるいは平均値)を求めることで、光線硬化シミュレーション画像を作成し、撮 影で得た画像とこの画像を差分することでビームハードニングの補正を行った。適用結果を図 4.2.6-2 に例示する。また、(a)の画像上に示した黄色の測線での各画像の CT 値分布を図 4.2.6-3 に示す。画像や CT 値分布から確認できるようにビームハードニングの影響が除去されていること が確認できる。なお、z 軸方向で試料の形状が大きく変化する場合には、本方法は適用できないこ とに注意されたい。



図 4.2.6-2 ビームハードニング補正

(WL:70、WW:40)



図 4.2.6-3 ビームハードニング補正前後の CT 値分布

(3) 割れ目の3次元可視化

X線 CT 画像から割れ目の領域のみを抽出するためには、適切なしきい値を求めて二値化処理する 必要がある。図 4.2.6-4 は、任意の医療用 CT 画像から求めた CT 値の頻度分布である。図から CT 値が-1000 と 1900 の周辺に明瞭なピークを確認することができる。-1000 のピークは岩石コア周辺 の空気であり、1900 のピークは岩石コア中の CT 値を示している。頻度分布を見て分かるように、 この分布から割れ目を抽出するためのしきい値を求めることができない。これは、岩石中の割れ目 を占める領域が岩石基質部に比べて相対的に少ないためである。図 4.2.6-5 は、「割れ目面」に直 交する方向(本研究では x 軸方向)の CT 値の最小値から求めた頻度分布である。前述したように CT 値はボクセル内に含まれる様々な物質の線減弱係数の平均値として出力されている。図 4.2.6-5 は、割れ目の領域と岩石の領域とが共存して存在する領域の頻度分布である。-250、1300、1700 周 辺にピークを確認することができる。1700 周辺のピークは、図 4.2.6-4 の岩石コアの分布の左側の 折れ曲がり点付近に対応し、1300 は図 4.2.6-4 の岩石コアの分布の左端に対応する。本研究では、 その中間の値である 1500 を割れ目抽出するためのしきい値として設定した。なお、-250 のピーク は、割れ目内に含まれる気泡の領域であると思われる。マイクロフォーカス X 線 CT 画像について も同様の処理を行った。



図 4.2.6-4 任意断面における CT 値の頻度分布(医療用 X 線 CT 画像)



図 4.2.6-5 割れ目面に直交する方向の CT 値の最小値から求めた頻度分布(医療用 X 線 CT 画像)

研削面画像の割れ目はレジンの割れ目面への浸潤、割れ目面近傍に存在する石英等の比較的透明 な鉱物での蛍光の散乱、撮影時に研削面を湿らせるために散布した水の拭き忘れによる蛍光の散乱 などにより、割れ目と岩石基質部との境界が不鮮明である。レジンに添加した蛍光剤の分離も合わ さって画像処理で割れ目を抽出することができなかった。そこで、RGB 画像である研削面画像を図 4.2.6-6 のように R、G、B に分解して観察した所、比較的 B チャンネルの画像が割れ目を抽出する 上で最適であった。したがって、研削面画像では B チャンネル画像を用いて割れ目の3 次元可視化 を行った。



RGB画像 Rチャンネル Gチャンネル Bチャンネル

図 4.2.6-6 研削面画像の RGB 分解

医療用 X 線 CT 画像から作成した割れ目の 3 次元可視化画像を図 4.2.6-7 に示す。しきい値の設 定は前述したとおりである。図から割れ目が一様に分布しておらず、とくに、12MI30-Uの下部、中 央部で割れ目が存在しない領域が確認できる。この領域は割れ目面が接触して閉塞しているものと 考えられる。また、割れ目内部に丸い穴が多数確認できるが、これは、xy-断面画像から確認され たように、割れ目近傍に存在する黒雲母などが部分体積効果により実際よりも大きく表示されてし まったために、見かけ上、割れ目を遮る形で存在したためであると考えられる。

表示視野(DFOV) 80.896 mm のマイクロフォーカス X 線 CT 画像から作成した割れ目の 3 次元可視 化画像を図 4.2.6-8 に示す。割れ目の分布の傾向は、医療用のものとほぼ同じである。医療用 X 線 CT 画像で見られた黒雲母等による割れ目の閉塞が多少減少している。

表示視野(DFOV) 33.792 mm のマイクロフォーカス X 線 CT 画像から作成した割れ目の 3 次元可視 化画像を図 4.2.6-9 に示す。画像の上段は、表示視野(DFOV) 80.896 mm のマイクロフォーカス X 線 CT 画像から作成した割れ目の 3 次元可視化画像に拡大撮影の範囲を示したものである(拡大撮 影の画像をオーバーラップさせたものではない)。拡大撮影で得られた画像から作成した割れ目の 3 次元可視化画像も図 4.2.6-7 や図 4.2.6-8 と大きな違いは認められない。割れ目面が接触した領 域、あるいは割れ目内に充填物が存在する領域として判断してもよいと考えられる。言い換えると、 定性的な割れ目の三次元的な分布を捉える目的であれば、医療用 X 線 CT 画像から作成した割れ目 の 3 次元可視化画像でも十分な精度を有しているものと考えられる。



図 4.2.6-7 医療用 X線 CT 画像から作成した割れ目の 3 次元可視化画像



図 4.2.6-8 マイクロフォーカス X線 CT 画像から作成した割れ目の 3次元可視化画像(撮影領域大) (マイクロフォーカス X線 CT、Case1)



図 4.2.6-9 マイクロフォーカス X線 CT 画像から作成した割れ目の 3 次元可視化画像(撮影領域小) (上段:拡大撮影の位置、下段:拡大撮影、左図: Case2、右図: Case3)

Grinding Tomography 法による割れ目 3 次元可視化画像を図 4.2.6-10 に示す。前述したように、 研削面画像を RGB 分解し、B チャンネル画像を用いて作成している。1 mm 間隔の研削で得た画像で あるので、割れ目の分布は粗い。しかし、分布の傾向は、X 線 CT 画像から作成した 3 次元可視化画 像と類似しており、12MI30-U の中央部や下部、12MI30-L の下部に幅の小さな割れ目が存在するこ とを改めて確認することができた。研削面画像の利点は、X 線 CT 画像からは識別が難しい鉱物(例 えば、充填鉱物)の情報を取得できる点であり、今回作成した割れ目の 3 次元分布と合わせて特徴 的な鉱物を画像中に落としこむことで割れ目のより詳細な情報を取得することが可能であると考 えられる。今後の課題としたい。



図 4.2.6-10 研削面画像から作成した割れ目の3次元可視化画像

(4) X線CTによる割れ目幅の算出

X線 CT から割れ目の開口幅を評価する方法は、亀裂の領域の平均 CT 値から評価する方法と二値 化処理により割れ目を抽出し割れ目領域の画素数から評価する方法の2つがある。

割れ目の領域の平均 CT 値から評価する方法は、例えば、菅原らが提案した亀裂投影法(菅原ほ か 1998)があり、比較的均質な試料を対象として、亀裂の領域と亀裂を含まない領域の平均 CT 値 の比を画像中に取り込まれた既知の寸法で補正することで画素の寸法以下の亀裂の幅を評価して いる。なお、この手法は花崗岩ように亀裂を含まない領域の CT 値が大きくバラつく場合は適用が 困難である。亀裂の領域に異なる物質で満たして、それらの画像の差を求めることで亀裂を含まな い領域を除去することも可能であるが、本研究のように岩石コアの状態を変化させることができな いものに対しては適用が難しい。したがって、本検討では、二値化処理により割れ目を抽出し、割 れ目の箇所の画素の数から割れ目幅を算出した。二値化するためのしきい値の設定は、3 次元可視 化画像を作成する際に行った方法を採用した。具体的な手順は以下のとおりである。

- ・ 「割れ目面」に直交する方向(本研究では x 軸方向)の CT 値の最小値から求めた頻度分布 からしきい値を算出する
- ・ yz-断面画像(割れ目に水平な方向の断面)を最小ピクセル間隔で作成する
- ・ 作成した yz-断面画像を二値化し、x 軸方向に投影する
- 投影画像のデジタル値は、割れ目領域に含まれるピクセル数に対応しているので、その数
 を単純に数えて、画像のピクセルの辺長で割れ目幅に変換する

以上の手順で算出した開口幅分布を図 4.2.6-11~図 4.2.6-13 に示す。図 4.2.6-11 は医療用 X 線

CT 画像から算出した開口幅の分布であり、開口幅が 0~0.6 mm の範囲を白黒濃淡で表示している。 黒色の箇所が開口幅 0 mm の箇所である。3 次元可視化画像を作成した時と同じしきい値を用いてい るので、その傾向は変わらない。図 4.2.6-12 は Case1 の条件で得たマイクロフォーカス X線 CT 画 像から算出した開口幅分布であり、開口幅が 0~1.2 mm の範囲を白黒濃淡で表示している。図 4.2.6-13 は Case2 および Case3 の条件で得たマイクロフォーカス X線 CT 画像から算出した開口幅 分布であり、開口幅が 0~0.5 mm の範囲を白黒濃淡で表示している。これらも 3 次元可視化画像を 作成した時と同じしきい値を用いているので、その傾向は変わらない。



図 4.2.6-11 医療用 X 線 CT 画像から算出した開口幅分布 (0~1.6 mmの範囲を白黒濃淡表示)



図 4.2.6-12 マイクロフォーカス X 線 CT 画像から算出した開口幅分布 (Case1) (0~1.2 mm の範囲を白黒濃淡表示)



図 4.2.6-13 マイクロフォーカス X 線 CT 画像から算出した開口幅分布 (Case2 および Case3) (0~0.5 mm の範囲を白黒濃淡表示)

次にそれぞれの開口幅分布(画像)から頻度分布を作成した。その結果を図 4.2.6-14~図 4.2.6-17 に示す。医療用 X線 CT 画像の開口幅の最頻値は 0.78 mm であり、想定していたものよりも大きい。 これは、画像のピクセルの辺長で機械的に開口幅を算出していることが原因である。前述したよう に CT 値はボクセル内に含まれる様々な物質の線減弱係数の平均値として出力されているので、1 ボ クセル内がすべて割れ目の線減弱係数でなくとも、その割合によっては割れ目として識別され、し きい値の設定に応じて CT 画像上で黒く表示される。さらに、二値化すると、その画像を構成する 画素の辺長と同じ寸法の割れ目が存在するかのように出力される。画像内に既知の寸法を取り込ん でいれば、校正できる可能性があるが、今回はそういった検討をしていないので、この幅の算定方 法の妥当性もあわせて今後の課題としたい。

マイクロフォーカス X 線 CT 画像から算出した開口幅の頻度分布は、画像の分解能が医療用のも のより高いので、そのピクセルの辺長に対応して頻度分布は左側へと移動している。画像の分解能 が上がれば、実際の開口幅に対応していくと考えられるが、医療用 X 線 CT 画像のものと同様に、 幅が大きく算出されている可能性が非常に高い。こちらも既知の寸法を岩石コアに取り込んで撮影 するなど検討する必要がある。今後の課題としたい。

以上、X線CT画像から割れ目の幅を定量する場合は、部分体積効果の影響に十分注意する必要がある。計測全般に言えるが、キャリブレーションデータの取得が必要不可欠である。



図 4.2.6-14 医療用 X 線 CT 画像から算出した開口幅の頻度分布



図 4.2.6-15 マイクロフォーカス X 線 CT 画像から算出した開口幅の頻度分布(Case1)



図 4.2.6-16 マイクロフォーカス X線 CT 画像から算出した開口幅の頻度分布 (Case2)



図 4.2.6-17 マイクロフォーカス X 線 CT 画像から算出した開口幅の頻度分布 (Case3)

(5) 研削面画像からの割れ目幅の算出

図 4.2.6-18 に示すように、画像に 1 mm 間隔の格子線をオーバーラップさせて、格子線と割れ目 が交差する x 軸方向の二点の座標を読み取り、二点の座標の差から割れ目幅を算出した。測定には NIH (National Institute of Health)が開発したオープンソフトウェア「ImageJ」を用いた。具 体的には、ImageJ の Multi-Point ツールを用いて割れ目と岩質部の境界の座標に印をつけながら手 動で測定した。データの測定点は、12MI30-U で約 6000 箇所、12MI30-L で約 5000 箇所、合計約 11000 箇所である。



図 4.2.6-18 割れ目幅測定方法の概念図

割れ目幅はレジンが充填されている開口部に限定した。割れ目内に充填物がある場合は閉塞部と して取り扱った。割れ目の分岐箇所は、連続性や主経路と判断される割れ目を選択し、レジンが充 填されていない場合でも連続性および主経路であるとの判断を優先した。レジンの中に気泡を含む 箇所については気泡がないものとして取り扱った。

前述したように、割れ目部と岩質部との境界が不鮮明で識別が困難である。そこで、割れ目部と 岩質部との境界を判定しやすいように、蛍光灯光源下の画像と紫外線光源下の画像の画像間の最大 値を出力した画像を作成し、さらに割れ目部と岩質部との境界を強調するためにガンマ補正、アン シャープマスク処理を施した。画像処理前後の画像を図 4.2.6-19 に示す。処理後の画像は、両画 像それぞれの利点を受け継いでおり、割れ目部は紫外線光源下の画像の利点、割れ目部と岩質部と の境界は蛍光灯光源下の画像の利点が反映されている。なお、割れ目幅の測定では上記の画像処理 を施した画像から割れ目部と岩質部との境界を抽出していったが、判断が難しい箇所も存在したこ とから、測定時、紫外線光源下の画像と蛍光灯光源下の画像も横に並べてクロスチェックしながら 割れ目部と岩質部との境界を抽出した。



図 4.2.6-19 割れ目幅測定のための画像処理 (a) 蛍光灯光源下 (b) 紫外線光源下 (c) 画像処理後の画像

割れ目幅の計測結果を図 4.2.6-20 に示す。図は画像から読み取った割れ目と岩質部の境界の座 標から算出した開口幅をもとに、0 ~ 0.4 mm の開口幅を白黒の濃淡で示したものである。割れ目 が閉塞している箇所 (0 mm) は黒色、0.4 mm 以上の幅は白色で表示している。割れ目幅分布の外縁 部がいびつな形をしているが、レジンからの蛍光剤の分離で読み取れなかった箇所や岩石コアをシ ールしていたシリコンシーラントが充填されていた箇所など割れ目幅を測定できなかったところ が存在したためである。また、読み取り誤差も含まれると思われるが、割れ目幅の分布の傾向は、 3 次元可視化画像と同様の傾向を示しており、割れ目が部分的に開口し、連続性が薄いことが確認 できる。

割れ目幅の頻度分布を図 4.2.6-21~図 4.2.6-23 に示す。図 4.2.6-21 は 12MI30-U の割れ目幅の 累積頻度分布、図 4.2.6-22 は 12MI30-L の割れ目幅の累積頻度分布、図 4.2.6-23 は両方を合わせ た割れ目幅の累積頻度分布である。表 4.2.6-1 に研削画像から求めた割れ目幅の平均値、中央値、 標準偏差、分散、および閉塞率を示す。開口幅の平均値は 0.18 mm であり、昨年度の HR-BTV 画像 から計測した開口幅と調和的である。



図 4.2.6-20 レジン充填コアの開口幅分布(研削面画像)



図 4.2.6-21 1 割れ目開口幅の累積頻度分布 (12MI30-U)



図 4.2.6-22 割れ目開口幅の累積頻度分布 (12MI30-L)



図 4.2.6-23 割れ目開口幅の累積頻度分布 (12MI30)

	12MI30-U	12MI30-L	12MI30
平均值(mm)	0.15	0.21	0.18
中央値(mm)	0.09	0.18	0.14
標準偏差(mm)	0.21	0.20	0.21
分散	0.04	0.04	0.04
閉塞率(%)	18.98	7.15	13.56

表 4.2.6-1 割れ目開口幅の統計(研削画像)

4.2.7 画像解析結果の整理・評価

X線CT法およびGrinding Tomography法をレジンが割れ目内に充填された岩石コアに適用し、割れ 目の可視化を行うとともに、割れ目の3次元可視化画像の作成および割れ目の開口幅の測定を実施し た。昨年度確認されたように、今回用いた岩石コアの割れ目幅は非常に小さく、割れ目が部分的に開 口し、連続性が薄い割れ目であることが確認された。以下、これまでの画像解析結果を整理するとと もに各手法間の比較を行い、解決すべき課題や今後の展望を提言する。

(1) 医療用 X 線 CT 画像とマイクローカス X 線 CT 画像の比較

空間分解能が異なる医療用X線CT画像とマイクロフォーカスX線CT画像とでは、特に、図4.2.7-1 に示すように閉塞した割れ目や割れ目近傍に存在する黒雲母の見え方で大きく異なった。ただし、 マイクロフォーカスX線CT画像は、試料サイズが今回使用した装置で最適なサイズでなかったこ とが影響して、アーチファクト(ビームハードニングアーチファクト、リング状アーチファクト) が画像上に激しく現れている。このアーチファクトを除去するために、画像解析では前処理として 平滑化処理が行われており、矢印で示した幅の小さな割れ目は、図に示したものよりも識別しにく いものになっている。このことが割れ目の3次元可視化において連続性の悪い分布になった可能性 も考えられることから、高出力のマイクロフォーカスX線CT(管電圧 320kV or 450kV)を利用す るか、岩石コアをトリミングして数 cm 程度に加工するかして、アーチファクトが極力現れない撮 影条件設定で画像を取得することが重要であると考えられる。



図 4.2.7-1 医療用 X 線 CT 画像とマイクロフォーカス X 線 CT 画像の比較 (a) 医療用 (b) マイクロフォーカス (Case1) (c) マイクロフォーカス (Case3)

2 次元断面画像で見られた断面画像での違いは、図 4.2.7-2 に示す 3 次元可視化画像にも反映され、特に、割れ目近傍に存在する黒雲母により、医療用 X 線 CT 画像から作成した 3 次元可視化画像では、粒状の穴が割れ目面に多数空いており未充填箇所と誤認する可能性がある。しかし、両者の割れ目分布の傾向は概ね一致しており、医療用 X 線 CT スキャナの撮影速度を考えると、同スキャナでの撮影は必要不可欠であると考えられる。



図 4.2.7-2 3 次元可視化画像の比較

(2) 医療用 X 線 CT 画像と研削面画像の比較

X線CT画像は、透過するX線のエネルギーが比較的低いとき、平均原子番号の大小の違いが画像 中に現れ、カリ長石といった鉱物の存在を確認することができる場合がある。本研究では、医療用 X線CT画像において、カリ長石と思われる鉱物の存在が確認され、鉱物の種類や形状を比較的確認 しやすい研削面画像との比較が可能であった。

図中の黄色の矢印に示す箇所で、割れ目の見え方が異なり、研削面画像でレジンが充填されてい ない箇所が医療用 X 線 CT 画像では比較的幅の大きい割れ目として認識されていることが確認でき る。これは、X 線 CT 画像では割れ目内部がレジン(水と同等の密度)である場合よりも空気である 場合のほうが鮮明に可視化されることが原因である。X 線 CT 画像からレジンの充填分布を評価する 場合には注意が必要である。とにく、割れ目の幅が小さくなるほど、割れ目内部を満たしているも のがレジンなのか空気なのかの判断が難しくなるので、研削面画像との比較は、そういった点から も重要であると考えられる。



図 4.2.7-3 研削面画像と医療用 X 線 CT 画像の比較

(3) マイクロフォーカス X線 CT 画像と研削面画像の比較

図 4.2.7-4 に、ほぼ同じ位置の研削面画像とマイクロフォーカス X 線 CT 画像を比較したものを 示す。図中の矢印の箇所は、蛍光灯光源下では割れ目内に物質が充填され、目視では開口した割れ 目と判断できなかった箇所である。しかし、蛍光灯+紫外線光源下での研削面画像やマイクロフォ ーカス X 線 CT 画像からは、この箇所は開口している。割れ目に充填された物質が割れ目と同等に CT 値が低いとは考えにくいため、割れ目面と充填物との間には隙間があり、この隙間をレジンが通 過したと思われる。X 線 CT 画像では、ボクセル内に含まれる様々な物質の線減弱係数の平均値とし て出力されているので、1 ボクセル内がすべて割れ目の線減弱係数でなくとも、しきい値によって は割れ目として識別される。割れ目幅といった寸法の定量においては注意すべきであるが、割れ目 の連続性や水みちについて議論する上では有用であると考えられる。ただし、割れ目面と充填物と の間に隙間があるという解釈を裏付けるためには、顕微鏡観察などを実施して検証する必要がある。 今後の課題としたい。



図 4.2.7-4 研削面画像とマイクロフォーカス X線 CT 画像の比較

(4) 開口幅の定量評価

X線 CT 画像から算出した割れ目幅は、研削面画像から算出したものに比べて大きな値を示した。 X線 CT 画像では、繰り返しになるが、ボクセル内に含まれる様々な物質の線減弱係数の平均値とし て出力されているので、1ボクセル内がすべて割れ目の線減弱係数でなくとも、その割合によって は割れ目として識別される。したがって、X線 CT 画像中の割れ目は実際のものと乖離する。ただし、 研削面画像から作成した開口幅分布と傾向が類似しており、X線 CT 画像から割れ目幅を定量的に評 価できる可能性がある。X線 CT 画像を用いた割れ目幅の評価は、簡易かつ迅速に行えるので、既知 の寸法を有した模擬亀裂供試体での検討を行うなど、手法の妥当性も含めて今後検討していきたい。 4.2.8 割れ目間隙の評価フローの提案

H23 年度から本年度まで実施してきた割れ目間隙の可視化結果および評価結果を踏まえて、図 4.2.8-1 に示す割れ目間隙の評価フローを提案する。以下、手順と評価する項目について述べる。

1) レジン充填コアの採取

定方位サンプリングを実施する。掘削時でのトラブルについては、割れ目間隙の可視化を行う 際の有用な情報となるので詳細に記録しておくことが望ましい。

2) 展開画像による方位の修正

コア採取後、直ちに医療用 X 線 CT スキャナでの撮影と BTV 検層による孔壁でのレジン充填状 況の観察を行う。医療用 X 線 CT 画像から 360°展開画像を作成し、BTV 検層による結果(割れ目の 走向・傾斜データ)を比較して、岩石コアの方位を修正する。

3) 割れ目面の可視化による透水卓越方向の検証

方位が修正された画像から割れ目とレジンの境界を抽出し、割れ目面の画像を作成する。ステ ップ状の凹凸が確認された場合は、そのステップの方向に直交する方向と Kriging で推定された 透水量係数場の結果とを比較し、透水卓越方向を推定する。

4) レジン充填領域の3次元可視化

適切なしきい値を用いてレジン充填領域の 3 次元可視化画像を作成する。レジンの充填体積、 開口幅、閉塞率を個々のボーリングコアで算定し、その結果を割れ目の近似平面上に投影し、割 れ目モデルを作成するとともに、対象割れ目の間隙構造の分布を推定する。

5) コア切断面の観察

ボーリングコアを半割にして、切断面上でレジンの充填状況を確認するとともに、巨視的な割 れ目の観察および評価を行う。その際、デジタルカメラで記録するだけではなく、地質を専門と する研究者、技術者が目視で観察し、特徴をスケッチすることが望ましい。このスケッチは割れ 目の生成過程や年代を推定する上で非常に重要である。

6) マイクロフォーカス X 線 CT 撮影

対象割れ目を含む領域を長さ 10 cm 程度に切断し、高出力のマイクロフォーカス X 線 CT 撮影 を実施し、より詳細な割れ目の 3 次元情報を取得する。できる限り端面アーチファクトが生じな いように円柱形に加工するなど工夫することが望ましい。医療用 X 線 CT での 3 次元可視化と同様 にレジンの充填体積、開口幅、閉塞率を算定し、すでに作成している割れ目モデルにその結果を 取り込み、割れ目モデルの精度向上を図る。

7) 薄片観察

割れ目の微視的な観察を実施する。ここでは収着に寄与する間隙構造を評価することを目的とする。とくに単一割れ目でないものに対しては、割れ目間隙率の算定などの定量評価も実施する。

- 4-59 -

また、この結果も対象割れ目の間隙構造の特徴に応じて、割れ目モデルに組み込む。

8) 研削面観察

研削面観察用に対象割れ目を含む領域を長さ10 cm 程度切断する。切断する方向は、対象割れ 目に水平な方向が望ましい。この切断された岩石コアを一定間隔で研削し、研削面をデジタルカ メラで撮影する。それらの画像から割れ目の開口幅、閉塞率、空間的自己相関、ラフネスなどを 評価する。この直接観察による信頼性の高い計測値をX線CT画像から作成した割れ目モデルに反 映させて、割れ目モデルのさらなる精度向上を図る。



図 4.2.8-1 割れ目間隙の評価フロー

4.3 原位置注入方法の検討

4.3.1 概要

平成23年度にスイスのGrimsel Test Site (GTS)において原位置レジン注入試験が実施されたが、 レジンから蛍光剤が分離していたこと、割れ目充填物が押し流された可能性があること、圧力、流量 の制御が納得の行く精度で行われていなかったなど、注入方法に関して課題が残った。

そこで、まずは改善点を明確にするために、過去に国内外で実施された原位置レジン注入試験について調査し、最適なレジン注入方法や開発すべき装置について検討を行った。国内外の事例として以下の3箇所について調査した。

- グリムゼル試験場 (Grimsel Test Site, GTS)
- 釜石原位置試験場
- エスポ地下研究施設(Äspö Hard Rock Laboratory, Äspö HRL)

4.3.2 グリムゼル試験場における既往の研究

グリムゼル試験場(GTS)は、スイス中央アルプスの海抜約1730m、土被り約450mのCentral Aare Massifの結晶質岩中にあり、既存の地下揚水式発電所へのアクセストンネルから直径3.5mの全断面 TBM を用いて新たに分岐掘削して建設されたものである。同試験場では、実施主体であるスイス放射 性廃棄物管理協同組合(National Co-operative for the Disposal of Radioactive Waste、Nagra) を中心に、日本、韓国、台湾、欧州各国が参画して高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究開 発を共同で実施している。処分地の候補地ではないが、試験場内には管理区域が設けられ、監視され た条件下で放射性核種の利用が可能であり、岩盤中での放射性物質の移行を直接調べることができる。 現在は第6フェーズ(2003-)のプロジェクトが進行中である。平成23年度に実施された原位置レジ ン注入試験はこの第6フェーズ中に実施されたものである。

原位置レジン注入試験の手法は、第4フェーズ(1994-1996)のNagraとJAEA(当時の組織名はPNC であるが混乱を避けるため現組織名を記載する)との共同研究で開発・確立されたものである (Alexander et al. 2003)。この共同研究は、第4フェーズ以前に実施された様々な放射性核種を用 いた原位置トレーサ試験(Migration Experiment、MI)の結果から構築した放射性核種の移行・遅延 モデルの妥当性を評価する目的で実施されて、RRP(Radionuclide Retardation Programme)と呼ばれ ている。RRP は大きく2つのプロジェクトから構成されている。原位置トレーサ試験といった原位置 試験研究で対象とした単一の透水性割れ目をレジンにより固定した後に開削し、放射性核種の移行・ 遅延を直接的に評価する「Excavation Project (EP)」と放射性核種の収着による遅延に影響を及ぼす 連結間隙の構造特性を評価する「Connected Porosity (CP) Project」で構成されている。EP ではエ ポキシ樹脂系接着剤が用いられ、CP ではアクリル樹脂系接着剤が用いられている。CP についてはアク リル樹脂系接着剤を使用した研究であるので調査対象外である。したがって、ここでは記述しない。

EP では、室内試験、パイロット試験、本試験という手順を踏んでエポキシ樹脂系接着剤による原位 置レジン注入試験手法の開発を行っている。その過程で、スイスに本社をもつ Sika 社の協力の下、 Sikadur 52(このレジンは日本支社である日本シーカ社においても製造・販売されている)をベース に Injection-26 と呼ばれる水の約 100 倍の粘性をもつ超低粘度形のエポキシ樹脂系接着剤(レジン) を開発している。また、このレジンは可使時間も長く、広範囲に注入・充填が可能であるという特徴 も有する。Injection-26 の仕様は表 4.3.2-1 のとおりである(Frieg et al. 1998)。ここで、ゲル タイムとはレジンが固まり始めるまでの時間のことであり、おおよそゲルタイムの 7 割程度が可使時 間だとされている。したがって、Injection-26 の可使時間は 105 分程度であると推定される。

水と濡れ性の異なるレジンを割れ目面に接着させるために、レジン注入前にイソプロピルアルコー ルを注入する方法も開発している。さらに安定した脈動の少ないレジン注入を実現するために、レジ ン注入には2液混合型のディスペンサー(ECONO-MIX D、DOPAG AG)を用いている。この2液混合ディ スペンサーは2台のポンプで主剤と硬化剤を別々に送り出し、主剤と硬化剤が交わる吐出口先端に取 り付けられたスタティックミキサーで均一に混合できる装置である(Alexander et al. 2003)。この 装置を使用して、グリムゼル試験場のメイントンネルから分岐する AU トンネルの起点から 126 m に位 置する AU トンネルを横断する断層(AU126、T ≒ 1 x 10-8 m2/s)でレジン注入のパイロット試験が 実施されている。手順は以下のとおりである。

① 断層面に対して直交方向に試錐孔を掘削(注入孔: BOEX 95.003、排出孔: BOEX 94.007)

- ② 孔間定流量注水試験の実施(HPLC pump を使用)
- ③ イソプロピルアルコール注入による割れ目間隙内の水の置換(HPLC pump を使用)
- ④ 15.5 時間後、イソプロピルアルコールの排出(Jet pump を使用)
- ⑤ 約1.5 L/min でレジン注入(蛍光剤は無添加、注入時間は165分)

⑥ 三週間後、断層面に対して水平方向に開削(外径 131 mm、内径 108 mm のコアバレルを使用)4本のボーリングコア(BOEX 95.007、95.008、95.009、95.010)を回収

⑤のレジン注入では、レジンの粘度を下げる目的で、混合前の主剤と硬化剤を 30-35℃まで温めて いる。

この試験で注入したレジンの量は表 4.3.2-2 のとおりである。良好なレジンの充填ができたようである。

<u> </u>	主剤	エポキシ樹脂	
土风万	硬化剤	変性脂肪族ポリアミン	
	主剤	987 (20°C)	
密度(kg/m3)	硬化剤	1142	
	混合物	1089	
	主剤	908 (13℃) 、410 (23℃)	
粘度(mPa・s)	硬化剤	35 (13℃) 、45 (23℃)	
	混合物	150 (13°C) 、100 (23°C)	
引張強度 (MPa)		12	
圧縮強度 (MPa)		約 50	
ゲルタイム		最大 2.5 時間	
混合比(重量比)		主剤:硬化剤 = 100:51	

表 4.3.2-1 Injection-26 の仕様

表 4.3.2-2 AU126 へのレジンの注入量

注入箇所	流入量	
ポンプ等のデッドボリューム	約710 mL (距離から評価)	
BOEX 95.003 孔の区間(パッカーで仕切った区間)	約 3250 mL(計算)	
BOEX 94.007 孔の区間(パッカーで仕切った区間)	約 180 mL(計算)	
断層 AU126	約 360 mL(計測値)	
合計	約 4500 mL	

パイロット試験で開発した手法を、AUトンネルの起点から96mに位置するAUトンネルを横断する 断層(AU96、T ≒ 2 x 10-6 m2/s)に適用している(本試験)。この断層はMIプロジェクトで対象と なった断層である。MIプロジェクトでは8本の直径86mmのボーリング孔を掘削しており、原位置レ ジン注入試験では、そのうち、注入孔としてBOMI 87.009 孔を、排出孔としてBOMI 87.006 孔を用い ている。孔間距離は1.7 mである。また、イソプロピルアルコールを注入する前に、強収着性の放射 性核種と非収着性Moも割れ目に注入されている。割れ目のレジンによる固定は、割れ目のみならず、 割れ目面に収着した放射性核種を化学的・物理的な擾乱を与えないように回収すること目的としてい る。強収着性の放射性核種と非収着性Moの注入以降は、パイロット試験と同様の手順を踏んでいる。 このときは、レジンに紫外線により黄色に発光する蛍光剤(Fluorol yellow-088、BASF)が添加され ている。レジン注入にはサーボ制御の2台のピストンポンプで構成された特別仕様の装置が用いられ ている。その装置の主要なスペックは以下のとおりである。

- ・ 最大注入圧力 2.0 MPa
- 注入流量速度:0 25 mL/min
- 主剤と硬化剤の混合比可変
- ・ 注入ラインで主剤と硬化剤の混合が可能(スタティックミキサー)
- ・ 注入圧力、注入流量の収録が可能なシステムを内蔵
- ・ 最大注入圧力を超えた場合、レジン注入を自動的に中断するためのアラーム機能を内蔵

本試験では、はじめに HPLC ポンプでトータル 6.0 L のイソプロピルアルコールを BOMI 87.009 孔 から注入した後、23 mL/min の流量速度で約7時間、BOMI 87.009 孔からレジンを注入している。排出 孔である BOMI 87.006 孔からも、断層内を完全にレジンで充填させる目的でレジン注入が行われてい る。レジン注入を終えた後、レジンが固化するまで約6週間養生させている(室内試験での検討では 硬化するまで3週間を要している)。割れ目内にレジンが充填されたコアの回収は、直径 368 mm の三 重管サンプラーを使用して行われている。掘削方向は割れ目面に対して水平方向であり、2本のボー リングコアを並列に掘削して回収している。

レジン注入時に計測された注入圧力と流量の経時変化(Alexander et al. 2009)から、非常に安定 した注入ができており、本事業でも同装置と類似したものを使用することが望ましいと考えられる。

4.3.3 釜石原位置試験場における既往の研究

釜石原位置試験研究は、地層処分研究開発の基盤研究である地層科学研究の一環として、「わが国 の地質環境を理解し、地下深部の実測データを取得すること」を目的に岩手県釜石市西部に位置する 釜石鉱山の既存坑道において実施された。同研究は、昭和 63 年度(1988 年 3 月)から平成 4 年度(1993 年 3 月)までの5年間(第1フェーズ)と平成5年度(1993 年 4 月)から平成9年度(1998 年 3 月) までの5年間(第2フェーズ)とに分けて実施された。第1フェーズでは、地下深部の基礎的な地質 環境特性の把握と現有の調査試験技術の適用性の確認を目的に、550 m レベル坑道(海抜 550 m、地表 下約 300 m)で実施され、第2フェーズでは、第1フェーズで得た知見をもとに、地質環境の深度依 存性の把握と坑道周辺の地質環境の詳細な把握を目的に、500 m レベル坑道に加えて 250 m レベル坑 道(海抜 250 m、地表下約 700 m)で実施された(核燃料サイクル開発機構 1999)。なお、試験対象 となった岩石は中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩(栗橋花崗閃緑岩)である。各フェーズの試験項目を表 4.3.3-1に示す(動力炉・核燃料開発事業団 1994;核燃料サイクル開発機構 1999)。表中の下線の 項目(タスク)においてレジン注入試験が実施されている。

第1フェーズの「単一割れ目の地下水流動試験」は、坑道近傍の地下水流動現象を明らかにする目

- 4-64 -

的で実施されている。この試験では、坑道壁面に現れた単一割れ目にトレーサを注入し、注入後に割 れ目面を挟む片方の岩盤を切り出し、水みちと割れ目面を詳細に観察・スケッチして水みちと割れ目 面との関連性を調査している(長ほか 1990;長ほか 1991;新見ほか 1992)。試験の対象となった割 れ目は、50 m レベル坑道内に分布する NW 押し坑道の起点から 500 ~700 m 区間に位置する坑道に斜 交した単一割れ目(割れ目③、④、⑨)である。トレーサにはエオシン、NaCl のほか、表 4.3.3-2 に 示すエオシンを添加したエポキシ樹脂も用いられている。エポキシ樹脂の注入にはハンドポンプが用 いられている。割れ目を切り出した後に、割れ目面上に付着したエポキシ樹脂を剥ぎとってその位置 と厚さを計測している。このエポキシ樹脂はコンクリート構造物に生じたクラックへの注入用に開発 されたもので、仕様上、開口幅 0.04 mm まで注入可能であったが、小さな幅の割れ目にはレジンが浸 透しなかったようである。とくに透水性が低かった割れ目④にはエポキシ樹脂はほとんど付着しなか ったようである。また、この試験では、坑道近傍の単一割れ目のチャンネリング現象を実験的に確か め、主要な流路の厚みが 1 mm にも達したことを報告している。また、試験後の飽和・不飽和浸透流解 析から、流路の透水係数が流路ではない部分とは二から四桁の違いがあることを報告している。

フェーズ	期間	試験研究項目	場所
フェーズ1	1988 ~1993 年	 ①地質構造 割れ目調査、 物理探査 ②地下水の水理特性 原位置透水試験 間隙水圧のモニタリング 地下水流動解析 <u>単一割れ目の地下水流動試験</u> トレーサ試験 ③地下水の地球化学特性 地下水の化学組成と起源 水-岩石反応試験 ④岩盤力学 初期地圧 掘削影響試験 ⑤地震 地下深部地震動観測 地震時の地下水水理変動調査 ⑥岩盤内充填粘土の挙動 占盤内充填粘土の挙動 岩盤内充填粘土学動試験 	550 m レベル坑道
フェーズ 2	1993 年 ~1998 年	TASK1:深部岩盤の地質構造・力学特性・水理特性・ 地球化学特性の把握 TASK2:深部岩盤における掘削影響領域の評価 TASK3:結晶質岩中の水理・物質移行に関する研究 <u>TASK3-1:収着およびマトリクス拡散に関する研</u> 究 <u>TASK3-2:移流および分散に関する研究</u> TASK4:人工バリア試験 TASK5:地震に関する調査研究	250 m レベル坑道 550 m レベル坑道

表 4.3.3-1 釜石原位置試験の調査項目

製品名		エポキシ加工樹脂 DM レジン(SSG12)	
		東都レジン化工株式会社	
内 先日	主剤	無色透明液体	
グト街兄	硬化剤	黄褐色液体	
粘度(mPa・s)※	主剤	200	
(試験温度:20℃) 硬化剤		700	

表 4.3.3-2 単一割れ目の地下水流動試験で用いたレジンの特性

※ 文献のとおり記載しているが、主剤と硬化剤の粘度は逆の可能性が高い

第2フェーズでは、Nagra との共同研究において開発した原位置レジン注入試験手法を釜石原位置 試験場に適用している。GTS において実施したレジン注入前の放射性核種の注入は、放射性核種が国 内では使用できないので、放射性核種と類似した元素を用いて実施している。550 m レベル坑道内に 分布するNW押し坑道の起点から500 ~700 m区間に位置する6本の透水割れ目(No. 30、No. 63、No. 114、 No. 115、No. 136、No. 137)および250 m レベル坑道の第8試錐座を起点として82.1 m 地点に存在する 透水割れ目(No. 99)を対象に実施している(山本ほか1998;核燃料サイクル開発機構1999)。使用 したレジンについて具体的な記載はないが、GTS で使用したSika Injection-26 が使用されたものと 思われる。レジン注入試験システムは、Nagra との共同研究で開発したもの(流量制御型)と国内で 開発したもの(圧力制御型)を使用している。

国内で開発した原位置レジン注入システムは、深度 200~1000 mm、孔径 40 mm の試錐孔に適用でき、 孔口から約150 mm 以深に分布する割れ目に対して注入量を測定しながらレジンの注入を行うことが可 能である。このシステムはメカニカルパッカー、レジンタンク、重量測定装置、加圧装置(窒素ガス 圧)からなり、最大 1.47 MPa の圧力でレジンの注入を行える性能を有している(松岡 1996)。この システムを試験場で適用した際、試験場の気温(16~17℃)がレジンの粘性が最低となる温度(30℃) より低かったため、注入できるレジン量が制限されるなどの問題が生じている。そのため、当初開発 したシステムに加温機能(シリコンラバーヒーター)を付加し、ヒーター温度と注入区間の圧力を同 時に測定できるシステムへ改良している(松岡 1997)。なお、改良後に試験場で本システムを適用し たかについて記載はなく、「現在よりもさらに効率的に多量のレジンを岩盤中に注入するためには、 エポキシ樹脂と固化材の混合制御機能や流量制御機能などを付加してシステムを改良するとともに、 データ集積機能を更に拡充させる必要がある」と報告している。本事業でもレジンに対する試験場環 境が与える影響については検討していかなければならない。ただし、温度を上げると相対的に可使時 間が短くなるため、レジンの粘性が最低になる温度まで加熱するといった過度な設定は避けるべきで あろう。

4.3.4 エスポ地下研究施設における既往の研究

スウェーデン核燃料廃棄物管理会社(Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company、SKB) は、エスポ島に建設した地下研究施設(Äspö HRL)で高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究 開発を進めている。エスポ地下研究施設は、オスカーシャム原子力発電所の敷地内からエスポ島まで の1500 m の斜坑とそれに続く深度460 m までの螺旋を描いて掘削された坑道で構成されている(Rhén et al. 1997)。坑道の総延長は3600 m であり、斜坑と螺旋状の坑道のほぼすべての区間は発破工法で 掘削され、最後の400 m のみを直径5 m の TBM で掘削している。同試験場でも、実施主体である SKB を中心に、8 カ国 9 機関が参画して高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究開発を共同で実施 している。

エスポ地下研究施設での研究は、事前調査期、建設期、操業期と段階を追って進められ、操業期に は空間スケール(広域スケール、サイトスケール、ブロックスケール、詳細スケール)に応じた研究 を実施している。原位置レジン注入試験は、操業期に実施された TRUE (Tracer Retention Understanding Experiment)と呼ばれる研究の一部であり、注入手法の開発にあたっては、グリムゼル 試験場での検討と同じように、室内試験、パイロット試験、断層ゾーンへの適用(便宜上、"本試験" と呼ぶこととする)という手順を踏んで行われている。なお、TRUE は、結晶質岩中での核種の移行お よび遅延プロセスを解明する目的で実施されており、詳細スケールでの単一割れ目内での物質移行を 対象とした試験(TRUE-1)とブロックスケールでの複数の割れ目での物質移行を対象とした試験(TRUE Block Scale)に大別される。

パイロット試験は、450 m レベルに位置する F トンネル(メインアクセストンネルに併設したトン ネル)の壁面から約 1~2 m に位置する割れ目を対象に実施されている(Birgersson 2000a)。レジン はウラニンを添加したエポキシ樹脂系接着剤(EPO-TEK 301)が用いられている(Birgersson 2000a; Birgersson 2000b)。レジンを注入するためのポンプは、2台のステッピングモータ駆動のピストン ポンプで主剤と硬化剤を別々に送り出し、主剤と硬化剤が交わる吐出口先端にスタティックミキサー を取り付けられた装置を開発している(Birgersson 2000b)。この装置はパイロット試験のために掘 削したボアホールでの水圧が 2.2 MPa であったことや、TRUE-1 の対象割れ目の間隙水圧が約 3.5-4.5MPa と高圧であることから、最大 6.0MPa まで耐えるよう設計されている。また、流量は数 ml/h から数 1000 ml/h までの制御が可能である。

対象割れ目へは、レジン注入、それに先立つ水理試験、トレーサ試験のために長さ 3-4 m、直径 56 mm の 9 本のボーリング孔が掘削されている。その中で比較的透水性の良いボーリング孔がレジンの注入孔(KXTP1、KXTP3、KXTP7)として用いられている。レジン注入・固化後には、レジンの充填状況の確認と対象割れ目の 3 次元 CAD モデル作成のために、長さ約 4 m、直径 56 mm の 12 本のボーリングコアが採取されている。さらに、レジンの厚さ、すなわち割れ目の開口幅の定量評価するために直径 200

mm と 146 mm の 6 本のボーリングコアも採取されている。なお、この大口径のボーリングを掘削する ために、掘削する箇所の中央には直径 36 mm のパイロット孔を掘削して大口径ボーリングによる岩石 コアの二次破壊を防ぐ試みを行っている。この点がその他の試験場とは異なる。

レジン注入に際して、グリムゼル試験場や釜石原位置試験場では、レジン注入前に、それぞれ放射 性核種、放射性核種に類似した元素を移行させ、レジンが移行する経路との対比を行っている。エス ポ地下研究施設ではそういった元素は用いず、レジン注入に先立つ水理試験に用いた水やイソプロピ ルアルコールにローダミンBの添加や、レジン(主剤)への蛍光剤(ウラニン)の添加とは別に、注 入孔ごとに異なる着色染料を添加して(KXTP1:緑、KXTP3:赤、KXTP7:青)、レジンの移行経路を把 握する試みも実施している。ただし、この試みは成功せず、レジンにウラニンのみを添加することが 望ましいと報告している(Birgersson 2000a)。

2- 4 /	主剤	-	
土成分	硬化剤	_	
	主剤	1.15	
比重	硬化剤	0. 87	
	混合物	1.09	
粘度 (mPa・s)		100 – 200 (23°C)	
ショアD硬度		81	
可使時間 (min)		30 (100 gサンプル)	
		50 (25 gサンプル)	
硬化時間(h)		1 (65°C)	
		24 (23°C)	
混合比(重量比)		主剤:硬化剤 = 4:1	

表 4.3.4-1 EPO-TEK 301 の特性

っづいて、TRUE-1の継続研究である TRUE-1 Continuation において、パイロット試験で得たレジン 注入のノウハウを断層ゾーンへ適用している。対象とした断層ゾーンは、トンネル坑口から 1596 m 地点、2163 m 地点、2430 m 地点、2545 m 地点に位置するものである。断層ゾーンへの適用に際して、 注入装置の制御方式を流量制御から圧力制御によるものに変更している。これは、割れ目内の未固結 充填鉱物を押し流さないため、あるいは注入圧の異常な上昇による断層ゾーンの破壊を懸念してのこ とであると推察される。使用した注入装置は、圧力容器にレジンをためて、窒素ガス圧で押し出すも のである。排出孔側には手動のクランクポンプを設置している(Winberg 2010)。レジンの粘度の温 度依存性に関しては、グリムゼル試験場、釜石原位置試験場での考え方とは異なり、温度が低いほう が、可使時間が長くなるため長時間の注入が可能であるとしている。そのため、レジンをためる圧力 容器を12℃で冷やしながらレジン注入を行っている(Winberg 2010)。

ボーリングコアの採取は、レジン注入から5ヶ月以上待って行われている。直径300 mm、長さ0.75 m のコアバレルを用いてボーリングコアが採取されている。このボーリングコアの中央には、パイロット試験と同様にパイロット孔が事前に掘削されており、その直径は76 mm である。

4.3.5 レジン特性に関する検討

各サイトで使用したレジンの名称、粘度、可使時間を表4.3.5-1に示す。グリムゼル試験場と釜石 原位置試験場(フェーズ2)で使用したレジン(過去の本事業で行った試験でも使用)が、広範囲か つ幅の小さな割れ目にレジンを充填させる上で最適であると思われる。しかし、「Injection-26」は 入手が困難なため、本事業では同等の性能を有するレジン(EP-400M、日本シーカ)を選定している。

Nagra が使用した Injection-26 の経過時間に対する粘度変化(Alexander et al. 2003)と昨年度の 本事業の計測で得たエバーボンド EP-400M の粘度変化を比較したものを図4.3.5-1 に示す。エバーボ ンド EP-400M が可使時間を超過した後に急激に粘度が上昇することを除けば、混合開始から約150分 までは Injection-26 と同等の性能を有している。それぞれの結果が、測定環境、測定装置の精度、測 定者に依るところは否めないが、粘度変化に限定すれば、むしろ Injection-26 よりもエバーボンド EP-400M の方が粘度の変化が小さく、安定していることがわかる。ただし、エバーボンド EP-400M の 粘度が、試験場環境下と同等の温度・湿度下で、図の粘度よりも高くなる可能性が考えられる。試験 場環境下の温度・湿度でエバーボンド EP-400M がどのような粘度変化を示すかについては今後取り組 む予定である。

サイト		名称	粘度(mPa・s)	可使時間 (min)
GTS		Sika Injection-26	150 (13°C) , 100 (23°C)	150(ゲルタイム)
釜石	フェーズ1	DM レジン (SSG12)	200(主剤),700(硬化剤)	_
	フェーズ 2	Sika Injection-26?	150 (13°C) , 100 (23°C)	150(ゲルタイム)
Ä	spö HRL	ЕРО-ТЕК 301	100 – 200 (23°C)	30 (100 g) , 50 (25 g)

表 4.3.5-1 各サイトで使用したレジン



図 4.3.5-1 Injection-26 とエバーボンド EP-400M との比較

4.3.6 レジン注入装置に関する検討

各サイトで使用したボンブの特徴をまとめたものを表4.3.6-1 に示す。制御方式は流量制御か圧力 制御に大別される。平成23年度の本事業では、流量制御と圧力制御の2つの制御方式でレジンを注入 させたが、両者とも主剤と硬化剤の混合は手動で行っている。この手動による混合が影響したためか、 安定した注入が行えていない。エスポ地下研究施設での断層ゾーンを対象としたレジン注入では、流 量制御による注入圧の上昇が断層内部の充填物を押し流すことを危惧してか、パイロット試験での流 量制御方式から圧力制御方式に変更している。しかしながら、主剤と硬化剤を手動あるいはハンドミ キサーで混合する方式は、作業者に依るところが大きく、均一に混合できるかは保証できない。また、 混合の時間を別途費やすと、その分可使時間が短縮され予想に反して広範囲にレジンが行き渡らない 可能性も考えられる。したがって、可使時間、主剤と硬化剤が交わる吐出口先端にスタティックミキサ ーを取り付ける装置を使用することが最適であると考えられる。また、ポンプにはピストンポンプよ りもレジン連続吐出時に脈動が少ないモーノポンプを使用することが望ましいと考えられる。ロータ ーの回転制御だけで混合比や吐出量を簡単に調整できる利点も有し、レジンの種類(混合比が異なる) が変わっても即座に対応でき経済的である。

開発するレジンポンプの概念図を図 4.3.6-1 に示す。図には記載していないが、流量制御による圧力の上昇については、レジンの注入圧および流量を計測し、フィードバック制御により注入圧力を制

- 4-71 -
御するか、リミッターを設ければ、前述の危惧はある程度解消されるものと考えられる。また、レジ ン中に溶け込んだ気泡が、割れ目内で脱泡することも考えられる。この点に関しても対策を講じる必 要があるが、これは実際に装置を制作した後検討していく予定である。

サイト		種類	制御方式	混合方式		
GTS		ピストンポンプ	ンプ 流量制御 スタティックミキサ			
	フェーズ1	ハンドポンプ	手動制御	手動		
釜石	フェーズ 2	ピストンポンプ	流量制御	スタティックミキサー (自動)		
		圧力容器+窒素ガス	圧力制御	手動		
Äspö	パイロット	ピストンポンプ	流量制御	スタティックミキサー(自動)		
HRL	本試験	圧力容器+窒素ガス	圧力制御	手動		

表 4.3.6-1 各サイトで使用したポンプの特徴



図 4.3.6-1 開発するレジン注入試験装置の概念図

4.3.7 レジン注入方法の検討

可使時間は注入孔口からレジンを充填させたい範囲へ行き渡る時間を設定する必要がある。すなわ ち、注入孔口から割れ目近傍までの注入管を通過する時間と一定範囲の割れ目を充填させる時間の和 相当以上が必要となる。したがって、繰り返しになるが、手動で主剤と硬化剤を混合するのではなく、 注入孔口から1.5ショット方式(主剤と硬化剤を別々のポンプで送り、注入直前に混合する方式)で 混合・注入することが広範囲にレジンを行き渡らせる点から望ましい。また、レジン注入する際に、 レジンを加熱するのか冷却すべきなのかは判断が難しいが、割れ目内の地下水の温度に合わせて温度 を調整することが望ましいと考えられる。いずれにしても、レジンを注入する間は、レジンがある程 度一定温度になるように注入方法を工夫する必要がある。今後の課題としたい。

表 4.3.7-1 は、各サイトでレジンに添加した蛍光剤とレジン移行経路の確認のために講じた工夫を 示したものである。本事業では表 4.3.7-1 に記載されているような工夫を行う計画はない。溶存ラド ン濃度計測や高粘性流体注入試験などで代替できるものと考えられる。

サイト		レジンに添加した蛍光剤	その他			
パイロット		無添加	イソプロピルアルコール (IPA) の注入			
615	本試験	ウラニン	放射性核種によるトレーサ試験, IPA の注入			
ダブ	フェーズ1	エオシン	エオシン水溶液によるトレーサ試験			
金口	フェーズ2	ウラニン(記載なし)	放射性核種の類似元素によるトレーサ試験			
Äspö	パイロット	ウラニン+着色剤	水および IPA へのローダミン B の添加			
HRL	本試験	Epodye、ストルアス社	_			

表 4.3.7-1 レジンに添加した蛍光剤とクロスチェックの工夫

4.4 レジンの物性試験

原位置レジン注入試験に使用するレジン材の要求性能を決定する上での参考資料を得る目的で、選定したレジンの物性試験を実施した。選定したレジン材はSS#1、EP-400Mの2種類で二液混合型の熱硬化性エポキシ樹脂系接着剤である。SS#1は初めて試験をするレジンであり、物性に関わる情報を得ることを目的とする。EP-400Mは昨年度の検討で可使試験や粘度試験などで、原位置試験への適用レジンとして最有力としたものであり、今年度は新たな測定項目も加えて適用性について再確認する。

4.4.1 可使時間測定試験

SS#1とEP-400Mはエポキシ樹脂(主剤)と硬化剤とを混ぜ合わせると重合反応により発熱をしながら 粘度が上昇して固化する。このため、この反応による発熱の経過変化を測定し、可使時間を測定する こととした。測定にはデータロガー(TR-71Ui、株式会社ティアンドデイ)と温度センサー(TR-1320、株 式会社ティアンドデイ)を用いた(図4.4.1-1(a))。混合したレジン 300gを 500mlのポリビーカーに 採取し、試料の中央部に温度センサーを設置後(図4.4.1-1(b))、一定時間間隔(1秒)で試料の発熱 温度を測定した。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、発熱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。発熱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。本検討で使用したレジン材は、発熱温度が急速に立ち上がる試料であった ため、可使時間はその立ち上がり時間の 70%とした。



(a) 可使時間測定の全体状況



(b) 温度センサーによる測定の様子

図 4.4.1-1 可使時間測定試験の実施状況

また SS#1、EP-400M には蛍光剤としてフルオレセイン、ナフチオン酸ナトリウムを混ぜたもの 2 体、 無添加のものを 1 体の合計を 3 体を 2 回ずつ、6 種、計 12 体を測定した。なお、これらの蛍光剤は岩 盤に注入したレジンが、後のボーリングで得たコアなどで視認しやすくするためにレジンに添加する。 したがって、蛍光剤がレジン物性へ与える影響を把握することも、この試験の目的である。可使時間 の測定結果を図 4.4.1-2~図 4.4.1-4 に示す。







図 4.4.1-3 EP-400M の可使時間測定結果



この温度測定の結果から温度の立ち上がり時間、および可使時間は表4.4.1-1のように評価される。 蛍光剤を添加しないサンプルの可使時間はEP-400Mで89-90分SS#1で76分程度である。しかしなが ら、図4.4.1-2~図4.4.1-4において主剤と硬化剤を混合してから、立ち上がり時間までの全過程を 見ると、表4.4.1-1とは異なる評価となる。蛍光剤を添加していない図4.4.14においてEP-400Mの 1stと2ndを比較すると、開始直後から両者のプロファイルの差が大きく、可使時間に向けてその差 は拡大している。これに対して蛍光剤のフルオレセインとナフチオン酸ナトリウムの2つの蛍光剤を 添加した場合の差は僅かで、明確な影響が存在するとまでは言えない。SS#1では1stと2ndでは EP-400M ほどに差がなないため、可使時間付近から立ち上がりにかけてルオレセインとナフチオン酸 ナトリウムを添加した方が立ち上がりが早いはやいことが読み取れる。EP-400Mの1stと2ndとの違 いは、おそらく試験中の環境の変化ためと考えられ、例えばエアコンの風向きや僅かな温度の変化の 影響を受けていると考えられる。このため、今後レジンの物性に関して試験を行う際は、恒温室など での測定など環境が変化しない工夫が望まれる。

レジン	立上/可使	蛍光剤無		フルオレセイン		ナフチオン酸ナトリウム		平均
	時間	1 st	2 nd	1 st	2 nd	1 st	2 nd	
EP-400M	立上時間(min)	128	127	135	127	128	127	129
	可使時間(min)	90	89	95	89	90	89	90
SS#1	立上時間(min)	109	109	107	108	109	111	109
	可使時間(min)	76	76	75	76	76	78	76

表 4.4.1-1 可使時間の評価結果

4.4.2 粘度測定試験

原位置でのレジン注入試験に用いるレジン材の要求性能のうち粘性のデータを得る目的で、選定し たレジン材の粘度を測定した。測定にはデジタル B 型粘度計(LV DV-II+Pro、Brookfield Engineering Laboratories, Inc. 図 4.4.2-1(a))を用いた。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 4.4.2-1(b)のように試料を 500ml のガラス製のグリフォンビーカに採取し、 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。このガードには 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のフルス 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 と量に応じて、今回の検討では LV1(図 4.4.2-1(c))と LV2(図 4.4.2-1(d))を用いた。レジン材(混 合物)の粘度は、主剤と硬化剤を混合した直後の粘度を測定するのではなく、粘度が急上昇する直前ま でを連続して測定した。その際、回転数を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SS#1、EP-400Mの2種類で、それぞれに蛍光剤3種(フルオレセイン、ナフチオン 酸ナトリウム、蛍光剤無し)を混ぜたもの3体を2回ずつ、6種、計12体を測定した。



(a) デジタル B 粘度計による計測



(b) ビーカー中のレジン撹拌状況



図 4.4.2-1 粘度測定試験の実施状況

測定・計測結果のプロファイルを図 4.4.2-2、図 4.4.2-3 に示す。SS#1 および EP-400M の粘度の変 化を見ると、試験開始から粘度の低下傾向が続く。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する大きな凸形状を描い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によ り、80 分~100 分付近まで見掛けの粘度が低下するためである。その後(見掛けの粘度の低下の収束 後)、今度は体積収縮を伴いながら見掛けの粘度が上昇し始め、発熱温度の立ち上がり時刻になると、 見掛けの粘度は急激に上昇をするためである。このような粘度の変化は、メーカーで示されている可 使時間や1 点のみの粘性時間では知ることができないが、原位置での実際の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。







図 4.4.2-3 EP-400Mの粘度測定結果

粘度における蛍光剤の影響については、SS#1 と EP-400M ともに蛍光剤を添加した方が全時間にわた って僅かながら粘度が上昇しているように見える。しかしながら、この相違は可使時間測定の際に述 べたように 1st と 2nd との違いの原因となっている温度環境の影響を受けている可能性があり、蛍光 剤の添加の影響とは明確には言えない。

4.4.3 硬度測定試験

レジンを坑道などに削孔したボーリングから岩盤へ注入する際には地下水が存在する。このため、 水がレジンの硬度に及ぼす影響を検討するため、気中環境下、高湿度環境下でのレジンの計時的な硬 度を日本工業規格「プラスチックのデュロメータ硬さ試験方法」(JIS K 7215-1986)に準拠して実施 した。供試体は 28.0 cm×22.0 cm のステンレス製トレイに 500g のレジンを流し込み厚さ 6 nm 以上のも のを作成した。使用するレジンは SS#1、EP-400M の 2 種類、これに蛍光剤 3 種 (フルオレセイン、ナフチ オン酸ナトリウム、蛍光剤無し)をそれぞれ混ぜたもの 6 体(図 4.4.3-1)を 2 種、合計 12 体の供試体を 用意し、気中環境下に 6 体、高湿度環境下に 6 体、1 ヶ月間養生し、期間毎にデュロメータ(図 4.4.3-2(a)) にて針貫入試験を実施した。



図 4.4.3-1 硬度測定試験の供試体

測定はユロメータに重錘を乗せて行う(図4.4.3-2(b))。測定はそれぞれ供試体の四隅と中央の5 箇所を2回、計10回の測定を行い、その平均を硬度とした。デュロメータは計測する試験体の硬度に よってタイプがあり、今回用いたタイプA(図4.4.3-2(c))とタイプD(図4.4.3-2(d))では針の形状が 異なる。SS#1は測定初日からタイプAの測定限界90を超えており、当初よりタイプDのみの計測と した。EP-400M は測定初日はレジン自体の硬化が不十分でタイプA でも測定不可、2 日目の測定はタイ プA の測定限界 90 を超えてしまい、タイプD の計測を試みるもタイプD で計測するには硬化が不十分 で計測不可、3 日目以降はタイプD の計測となった。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るが、実際 50N の重錘を使用して計測して みると硬化不十分で計測が出来ないため、30N(約 3kgf)の重錘とした。



図 4.4.3-2 硬度測定試験の実施状況

測定結果を図 4.4.3-3 と図 4.4.3-4 に示す。この試験結果によれば SS#1 および EP-400M ともに、9 日目に 80-85 の硬度を発現した後、硬度は計測が終了するまでほぼ一定であった。蛍光剤を添加した 結果では、SS#1の高湿度環境で養生したレジンはレジンなしに比べて 1~3 程度硬度が低下していた。 EP-400M でも蛍光剤を添加し高湿度環境で養生したレジンの硬度が低いが、その差はごく僅かで 1 以 下である。







図 4.4.3-4 EP-400Mの硬度試験結果

4.4.4 付着強度試験

水がレジンの付着強度に及ぼす影響を検討するために、平行平板の模擬亀裂を作成し、その亀裂に レジンを充填させて、接着力試験器を用いて硬化後の付着強度を測定した。気中環境下、水中環境下 でのレジンの付着強度を日本工業規格 JIS A 6909 に準拠して実施した。

供試体は 30.0cm×30.0cm×6.0cmの花崗岩盤(図 4.4.4-1(a))の四隅に 1.0mmのステンレス製スペーサ ーを置き(図 4.4.4-1(b))、中央に直径 20mmの円孔を設けた 30.0cm×30.0cm×3.0cmの花崗岩盤(図 4.4.4-1(c))を重ね合わせ(図 4.4.4-1(d))、中央の円孔からレジンを流し込む。



図 4.4.4-1 付着強度試験の供試体

使用するレジンはSS#1、EP-400Mの2種類、SS#1には蛍光剤の有無、蛍光剤の種類によって3種(フルオレセイン、ナフチオン酸ナトリウム、蛍光剤無し)をそれぞれ混ぜたもの3体を気中環境下と水中環境下で作成したもの2種、合計6体。EP-400Mには蛍光剤は混入せず気中環境下と水中環境下で作成したもの2体の供試体を用意する。

気中環境下用供試体のレジンの注入方法は供試体上部を外した状態) でレジンを適量垂らし込み (図 4.4.4-2(a))、上盤を乗せ、レンジ及びエア抜き用の四方向、一部箇所を除いて) で上盤と下盤の 溝を塞ぎ、孔を埋める(図 4.4.4-2(b))。円孔からレジンを徐々に注入し、エア抜き箇所からレジンが

- 4-82 -

排出したのを確認後、パテで塞ぎ、完全にレジンの流出を停止する。レジンがパテを押し出さない用 にパテの上から包帯を巻き、その上から養生テープを巻いて(図4.4.4-2(c))1ヶ月間養生した。水中 環境下用供試体のレジン注入方法は花崗岩盤が重ね合わせた状態でレンジ及びエア抜き用の四方向、 一部箇所を除いて水中ボンド(エポキシ系水中硬化型充填接着剤 2083L、Three Bond)を用いて孔を埋 める。レジンを上部円孔から注入しエア抜き箇所からレジンが排出したのを確認後、水中ボンドでエ ア抜き箇所を塞ぎ、上部円孔からレジンを追加注入しレジンが漏れていないか確認しその状態で1ヶ 月間養生した(図4.4.4-2(d))。



図 4.4.4-2 付着強度試験の実施状況1

1ヶ月間養生した供試体を医療用 X 線 CT で撮影してレジンの充填状況を確認した上で、四隅に 4.0 ×4.0cmの測定箇所を設定し、その周辺を供試体下岩盤部まで大型切断機で切断し(図 4.4.4-3(a)、 (b)、(c))、試験用鋼製治具を接着した(図 4.4.4-3(d))。 接着時は治具接着面及び供試体接着面 を研磨及び除油した後に強力接着剤(ボンド クイックメンダー #16351、コニシ)を用いて接着した。 測定には簡易型引張試験器(R-10000ND、サンコーテクノ (図 4.4.4-3(e))を使用し、試験器を測定 する箇所上部にセットし水準器を使用して水平をとり実験を実施した(図 4.4.4-3(f))。



図 4.4.4-3 付着強度試験の実施状況 2

試験結果を測定・計測結果を表 4.4.4-1 に示す。試験の結果、予想以上にレジンの強度があり、特 に気中でレジンを充填・養生した試料は、鋼製治具周辺部で材料破壊(図 4.4.4-4(a))及び上下岩盤 部で材料破壊(図 4.4.4-4(b)、(c))が生じた。一方、水中でレジンを充填・養生した試料では、SS#1 のフルオレセインとナフチオンナトリウム、蛍光剤を添加しなかったケースのみ界面の破壊(図 4.4.4-4(d)~(f))が確認できており、SS#1 については水中充填・養生で相対的に付着強度が低下する ことが考えられる。以上の結果はレジンの付着強度を定量的に判断するには十分な結果ではないため、 付着強度試験方法の工夫と具体的な強度の評価を今後の課題としたい。

表 4.4.4-1 付着強度測定結果

	試験名	蛍光剤	養生環境	付着強度				
レジン				0	0	3	3′	4
				(N/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)
	5-A-1	蛍光剤無	気中環境	5.169843	5.31 05 07	3.264028		5.968553
EP-400M	5-A-2	蛍光剤無	水中環境	5.519838	5.943888	6.21 039		5.421976
SS#1 -	5-B-1	フルオレセイン	気中環境	4.230336	4.558645	3.850504	01000000000000000000000000000000000000	3.830703
	5-B-2	フルオレセイン	水中環境	1.695694	1.366552	2.349685		1.530842
	5-B-3	ナフチオン酸ナトリウム	気中環境	4.505971	4.581864	4.663575	4.581.663	5.157217
	5-B-4	ナフチオン酸ナトリウム	水中環境	1.26753	2.507713	2.004985		1.785726
	5-B-5	蛍光剤無	気中環境	4 666453	4.496066	4.789576		4.359979
	5-B-6	蛍光剤無	水中環境	4.730399	4.100841	3.545604		4.312083

: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



図 4.4.4-4 付着強度試験による破壊面の状況

4.4.5 分離確認試験

水および岩石との接着を良好にするために用いられるイソプロピルアルコール(以下 IPA)がレン ジから蛍光剤を分離させる要因となることを明らかにするため、水中で蛍光剤を添加したレジンを硬 化させ、硬化後の蛍光剤の分布を目視、および紫外線照射によるデジタルカメラ撮影により観察する。 試験に使用するレジンは SS#1、EP-400M の2種類である。SS#1は IPA と水で置き換えた試料(以下 IPA 有)と、水のみで置き換えた試料(以下 IPA 無)の2種に、蛍光剤2種(フルオレセイン、ナフチオン 酸ナトリウム)をそれぞれ混ぜたレジンを置き換えて作成した供試体2種、合計4体。EP-400M にはフ ルオレセインを混入した IPA 有と IPA 無で作成したもの2体の供試体を用意する。

IPA 有の供試体は φ 100.0mm×100.0mm にカットしたサミットモールド(図 4.4.5-1(a))に砕石試料を 敷き詰め、50%濃度の IPA を注入。(図 4.4.5-1(b)) 12 時間静置させ、軽く水洗い後(図 4.4.5-1(c))、 サミットモールドに戻し、水を注入し再び 12 時間程静置する。(図 4.4.5-1(d)) IPA 無の場合はサミ ットモールドに砕石試料を敷き詰め、水を注入し 12 時間静置する。以降の手順は IPA 有、IPA 無とも に同じである。



図 4.4.5-1 分離確認試験の供試体(IPA 有)

必要量の砕石を取出し、塩ビパイプ(図 4.4.5-2(a))を斜めに奥まで差し込み(図 4.4.5-2(b))、塩 ビパイプ上部からレジンを注入する。注入レジンは約 470ml である(図 4.4.5-2(c))。 水面からレジ ンが確認出来たら(図 4.4.5-2(d))、徐々に塩ビパイプを引き抜き、下部に砕石を行き渡らせる。塩ビ パイプを抜き、除いていた砕石を元に戻し、必要量レジンを注入し(図 4.4.5-2(e))、養生した。(図 4.4.5-2(f))。



図 4.4.5-2 分離確認試験の実施状況 1

レジン硬化後(図 4.4.5-3(a))、サミットモールドから供試体を脱型する。モールドの両端を切れ目 に沿ってペンチでモールドを外すと(図 4.4.5-3(b)、(c))、円柱形状の礫が入ったレジン固化体が得 られた(図 4.4.5-3(d))。これを長軸方向に切断して試料とした。



図 4.4.5-3 分離確認試験の実施状況 3

EP-400M とフルオレセインの組み合わせで、IPA の有無が異なる試料を自然光および紫外線照射で 写真撮影したものを図 4.4.5-4(a)~(d)に示す。また、SS#1 とフルオレセインの組み合わせで、IPA の有無が異なる試料を自然光および紫外線照射で写真撮影したものを図 4.4.5-4(e)~(h)に示す。こ の結果によれば、EP-400M は自然光と紫外線照射ともに IPA を使用しない方が輝度が高く撮影されて いる。IPA と水で置き換えた試料のレジンをよく観察すると、オリジナルのレジンよりも濁りがあり、 透明感が失われている。IPA 有の試料において、レジン中の蛍光剤が分離するなどの現象も認められ なかったことから、IPA によってレジンの透明度が失われることにより、間接的に蛍光の輝度が低下 して観察されたと考えられる。一方、SS#1 は IPA の有無による自然光と紫外線照射の撮影における差 異はなかった。



図 4.4.5-4 IPA の有無による蛍光輝度の差

(EP-400M+フルオレセイン、SS#1+フルオレセイン)

次に、SS#1とナフチオンナトリウムの組み合わせで、IPAの有無が異なる試料を自然光および紫外線照射で写真撮影したものを図4.4.5-5に示す。この結果によれば、SS#1は IPA の有無による自然光 と紫外線照射の撮影における差異は認められなかった。

以上のことからレジンを EP-400M に選定して、原位置試験においてボーリング孔に IPA を注入した際は、十分に割れ目内を洗浄した後にレジンの注入をする必要がある。



図 4.4.5-5 IPA の有無による蛍光輝度の差

(SS#1+ナフチオン酸ナトリウム)

4.5 レジンの浸透解析

4.5.1 概要

本章では岩盤内にレジンを注入し、浸潤したレジンの分布を観察することにより、数mスケールの 岩盤の詳細な水みち分布を評価する技術の開発を目指している。前節に示したように、本章で検討し ているレジンは主剤と硬化剤から成り、原位置注入試験においては両者を混合させた後に岩盤へ注入 する。しかし、最も粘性の低い ep400m でも、混合直後に水の 100 倍程度の高い粘性を示し、時間の経 過とともにさらに粘性が高くなり、約 10,000 秒後には硬化してしまう。そのため、岩盤内の水みち割 れ目に対するレジンの浸透特性を把握しておく必要がある。数mスケールの岩盤割れ目へのレジンの 浸透特性を室内試験で調査することは困難であるため、ここでは実際に原位置で使用する可能性の高 い EP-400M について数値解析により岩盤割れ目への浸透特性を評価することとした。

4.5.2 解析条件

4.5.2.1 解析モデル

解析領域は、図 4.5.2-1 に示すように岩盤中の水平な単一割れ目を想定した一辺の長さが 20 mの 正方形領域とし、その中心に樹脂を注入するための直径 86 mmのボーリング孔を配置した。

解析メッシュを図 4.5.2-2、図 4.5.2-3 に示す。解析モデルは二次元であり、セルは全て四角形で 構成されており、全セル数は 12,128 である。注入孔付近は、注入孔境界に接するセルの幅が 0.001m に なるように細かく分割した。



図 4.5.2-1 解析領域



図 4.5.2-2 解析メッシュ (全体図)



4.5.2.2 解析手法

今回の解析では、粘度が注入孔から注入された後の経過時間(すなわち材料時間)に依存して変化 するようにする必要がある。そのためには、流入した流体粒子に流入時刻が分かるような変数値を割 り当てておき材料時間を計算する。ここでは汎用の熱流体解析プログラム fluent を使って計算を行 うことにした。

材料時間の計算

以下の方程式を計算する。ここでSはレジンの流入時刻を表すための変数である。これは変数S が流体粒子の移動経路に沿って保存されることを表している。

$$\frac{DS}{Dt} = \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} = 0$$

上式をラグランジ的に時間積分すると S=一定値 となる。S の境界条件として流入境界から流入 した時刻を設定しておけば、変数 S にアクセスすることでその流体粒子の流入時刻を知ることがで きる。材料時間は、流体粒子が解析領域内に流入してからの経過時間であるとすれば、材料時間 t_m を以下の式で計算することができる。

 $t_m = t - S$

ここで、 t は現在時刻である。



図 4.5.2-4 レジンの流入時刻を表す変数 S

(2) Hele Shaw 流れ

今回の解析モデルでは二次元モデルを使った解析を行う。流れ場を計算する際には、この二次元 領域(x-y 面)は厚み方向(z 方向)の影響を考慮したモデルにしておく必要がある。今回の計算 では割れ目内の流れを Hele Shaw 流れとして表す。

割れ目を通過する一次元流れを考える。

流れ場を記述する方程式は以下のようになる。

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

この式を z 方向に積分することで流速分布が得られる。

$$u(z) = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left(z^2 - \frac{b^2}{4} \right)$$

この流速分布から断面平均流速を計算すると以下のようになる。

$$\overline{u} = \frac{1}{b} \int_{-b/2}^{b/2} u dz = -\frac{b^2}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x}$$

これは、割れ目を通過する流速と圧力勾配の関係を表しており、fluentを使った二次元モデル計算ではこの関係式を、多孔質体モデルとして組み込む。

浸透流解析では、流速は透水係数と動水勾配の積で表す。上記関係式から透水係数を求める。

$$\overline{u} = -\frac{b^2}{12\mu}\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{b^2}{12\left(\frac{\mu}{\rho g}\right)}\frac{\partial\left(\frac{p}{\rho g}\right)}{\partial x} = -\frac{\rho g b^2}{12\mu}\frac{\partial h}{\partial x} = -K'\frac{\partial h}{\partial x}$$

従って透水係数 K' は以下のようになる。

$$K' = \frac{\rho g b^2}{12 \mu}$$

なお、上式は割れ目内の断面平均流速と動水勾配を関連づける係数であり、後述の基準割れ目厚 さから求まる平均流速を使う場合には透水係数の表現は異なることに注意が必要である。



図 4.5.2-5 Hele Shaw 流れ

(3) fluent への実装

fluent は汎用の熱流体解析プログラムであり、基礎方程式はナビエストークス方程式である。ナ ビエストークス方程式に適用する際の流速に注意する必要がある。流速には、二つの解釈が存在す る。一つは割れ目厚み方向に平均した見かけ流速であり、もう一つは実際の流れ場に生じている実 流速である。実流速は見かけ流速を空隙率で割った値に等しい。

基準の割れ目厚さを b₀とした場合の、見かけ流速を U(および V)とする。実流速 *ū*と見かけ流 速 Uには以下の関係式が成り立つ。

 $\overline{u}b = Ub_0$

ここで、 b は実割れ目厚さである。

割れ目に出入りする流量の収支を考えると以下の連続方程式が得られる。

$$\frac{\partial(Ub_0)}{\partial x} + \frac{\partial(Vb_0)}{\partial y} = 0$$

ここで、boは一定であることから、以下の式が得られる。

 $\frac{\partial(U)}{\partial x} + \frac{\partial(V)}{\partial y} = 0$



図 4.5.2-6 基準の割れ目厚と見かけ流速



図 4.5.2-7 実流速と実割れ目厚

次に運動方程式について考える。多孔質体を通過する流れ場の運動方程式は普通のナビエストー クス式に抵抗を表す項 (μU/α)が追加される。ここでαは多孔質体の透過率である。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\mu}{\alpha} U_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

ここで、実際には右辺第一項、第二項のみが支配的であると考えられる。すなわち多孔質体を通 過する流れの運動方程式は以下のようになる。

$$0 = -\frac{\mu}{\alpha} U_i - \frac{\partial p}{\partial x_i}$$

ここで先に求めた Hele Shaw 流れの流動特性を上記式に適用する。

$$U = \left(\frac{b}{b_0}\right)\overline{\mu} = -\frac{b^3}{12\mu b_0}\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\alpha}{\mu}\frac{\partial p}{\partial x}$$

これから透過率αを求めると以下のようになる。

$$\alpha = \frac{b^3}{12b_0}$$

圧力 p は水頭 h と p=pghの関係にあることから

$$U = -\frac{b^3}{12\mu b_0} \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\rho g b^3}{12\mu b_0} \frac{\partial h}{\partial x}$$

となる。したがって、透水係数 K は以下のように求められる。

$$K = \frac{\rho g b^3}{12 \mu b_0}$$

fluent を使った解析では割れ目厚さに対応して透過率を設定して計算を行うようにする。また、 粘度については前記の材料時間を使い、ユーザ定義関数で粘度を計算する。その際に流入時刻を表 す変数を計算する輸送方程式を一個追加する。また VOF 法を使い界面を追跡するようにした。

4.5.2.3 初期条件と境界条件

初期時刻には、全領域が水で充満しており、流れは無いものとした。

流入境界(486 の注入孔の壁面)では圧力を注入圧に指定した。流出境界(解析領域の周囲 4 辺) では、圧力をゼロと指定した。 4.5.3 解析結果

4.5.3.1 一様な開口幅の割れ目を対象とした解析

割れ目を平行平板と仮定し、レジンの浸透解析を実施した。レジンとしては、最も粘性の低いエバーボンド EP-400M を対象とした。割れ目の開口幅として、0.01 mm~1.0mm の範囲の 10 通りを想定した。また、レジンは注入圧力を一定として割れ目に注入されるものとして、0.5 MPa と 1.0 MPa の 2 通りの注入圧力を想定した。初期時刻において、割れ目は全領域が水で飽和していると仮定した。

割れ目を平行平板と仮定しているために、図4.5.3-1に示すようにレジンは注入孔を中心とした同 心円状に浸透していく。レジンの浸潤半径(注入孔から浸潤フロントまでの距離)の計算結果を図 4.5.3-2~5に示す。割れ目内の一点から放射状に注入していること、注入圧力を一定として注入して いること、時間の経過とともにレジンの粘性が高くなることなどから、浸潤半径の増加速度は時間と ともに遅くなる。また、開口幅の狭い割れ目ほど、浸潤速度は遅い。注入圧力を0.5 MPa とした場合、 解析領域の境界までの距離である 10 m に達するのに要する時間は開口幅 1.0 mm の割れ目で 820 秒、 0.3 mm の割れ目で 8,800 秒であった。一方、開口幅 0.1 mm の割れ目では、境界に達する前にレジン が硬化してしまい、注入孔から 4 m の距離までしか浸潤しなかった。注入圧力を 1.0 MPa とした場合、 境界に達するのに要する時間は短縮され、開口幅 0.3 mm の割れ目では 4,400 秒となっている。注入圧 力を 1.0 MPa としても、開口幅 0.1 mm の割れ目では 4,400 秒となっている。注入圧 力を 1.0 MPa としても、開口幅 0.1 mm の割れ目では硬化する前に境界に達することはできないが、注 入孔から 5.3 m の距離まで浸潤した。開口幅が狭くレジンが注入孔より遠くまで浸潤しない割れ目で は、実際の注入試験時には注入孔を複数用意することが必要と考える。



図 4.5.3-1 一様な割れ目へのレジンの浸潤の例(開口幅 0.01 mm、注入圧力 1 MPa、9019 秒後)



図 4.5.3-2 レジンの浸潤半径の経時変化(割れ目開口幅 0.1~1.0 mm、注入圧力 0.5 MPa)



図 4.5.3-3 レジンの浸潤半径の経時変化(割れ目開口幅 0.1~1.0 mm、注入圧力 1.0 MPa)



図 4.5.3-4 レジンの浸潤半径の経時変化(割れ目開口幅 0.01~0.1 mm、注入圧力 0.5 MPa)



図 4.5.3-5 レジンの浸潤半径の経時変化(割れ目開口幅 0.01~0.1 mm、注入圧力 1.0 MPa)

4.5.3.2 不均質な割れ目を対象とした解析

開口幅が一様でない不均質な割れ目を対象として、レジンの浸透解析を実施した。解析領域を一辺の長さ0.1 mの小正方形ブロックに分割し、各ブロックに透水量係数の値を確率的に発生した。その際、表4.5.3-1 に示す統計量(Abelin, 1985)を基に、パターンAとBのそれぞれについて10通りの透水量係数(単位:m2/sec)の不均質場を発生させた。透水量係数の空間的な相関モデルとして、指数関数型のバリオグラムを仮定した。発生した透水量係数場の例を図4.5.3-6 に示す。続いて、透水量係数が開口幅の3乗に比例するという3乗則により、各小正方形ブロックの割れ目開口幅を算出した。

図 4.5.3-6 に示した不均質割れ目に対し、注入圧力を1 MPa とした場合の硬化する 9,900 秒後の割 れ目内の樹脂の分布の解析結果を図 4.5.3-7 に示す。樹脂が同心円状ではなく、通りやすいところを 選択して浸透している様子がわかる。

また、パターンAとBの10通りの不均質割れ目に対する樹脂の浸潤半径(円周方向の平均)の経時 変化を、図4.5.3-8、図4.5.3-9にそれぞれ示す。パターンAでは、9,900秒後の樹脂の平均的な浸 潤半径は、最大の割れ目で3.48m、最小の割れ目で1.96m、10通りの割れ目の平均で2.86mと不均 質場により差が見られた。発生した不均質場の開口幅の幾何平均はいずれの割れ目でも0.049mmであ り、0.049mmの一様な開口幅を有する割れ目では浸潤半径は2.87mで、上記の10通りの不均質割れ 目の浸潤半径の平均と一致した。一方、パターンBでは、9,900秒後の樹脂の平均的な浸潤半径は、 最大の割れ目で4.14m、最小の割れ目で2.07m、10通りの割れ目の平均で3.07mで、パターンAと は若干の差が見られた。これはパターンBの方が相関長が長いため、浸透性の高い経路の連続性が高 いためと推測される。

図 4.5.3-10、図 4.5.3-11 に示すように、注入孔のまわりの透水性が高い割れ目ほど、樹脂の浸潤半 径が大きくなる傾向が見られた。

パターン	対数平均	対数標準偏差	相関長(m)
А	-7.0	0.667	0.1
В	-7.0	0.667	0.2

表 4.5.3-1 透水量係数場の発生に使用した統計量



図 4.5.3-6 確率的に発生させた割れ目の透水量係数分布の例 (パターン A)



図 4.5.3-7 不均質な割れ目への樹脂の浸透結果の例 (パターン A)



図 4.5.3-8 レジンの浸潤半径の経時変化(パターン A の 10 リアライゼーション、注入圧 1MPa)



図 4.5.3-9 レジンの浸潤半径の経時変化(パターン Bの 10 リアライゼーション、注入圧 1MPa)



図 4.5.3-10 注入孔から 20cm までの透水量係数対数平均と平均浸潤半径 (パターン A、注入圧 1MPa)



図 4.5.3-11 注入孔から 20cm までの透水量係数対数平均と平均浸潤半径 (パターン B、注入圧 1MPa)

4.5.4 解析結果の整理

水平な単一割れ目を想定して、レジン(エバーボンド EP-400M)の浸透特性を数値解析により評価した。

まず、割れ目を0.01~1mmの範囲の一様な開口幅を有する平行平板と仮定し、レジンの浸透解析を行った。割れ目内の一点 から放射状に注入していること、注入圧力を一定として注入していること、時間の経過とともにレジンの粘性が高くなること などから、浸潤半径の増加速度は時間とともに遅くなる。開口幅の狭い割れ目ほどレジンの浸潤速度は遅い。注入開始から約 10,000 秒後にはレジンは硬化してしまうために、それ以降レジンは浸潤しなくなる。例えば、注入孔から半径 2m までのレジ ンの浸潤を期待する場合には、注入圧力 0.5 MPa では開口幅 0.05 mm 程度、注入圧力 1.0 MPa では開口幅 0.03 mm 程度までが 限界となる。注入圧力を高くすれば開口幅の狭い割れ目へ浸潤させることは可能であるが、割れ目に充填物がある場合には充 填物を移動させてしまう可能性が生じる。そのため、原位置試験では、高い注入圧力を避け、複数の孔からレジンを注入する ことも検討する必要がある。

続いて、開口幅が一様でない不均質な割れ目を対象とした浸透解析を実施した。文献による透水量係数の統計量に基づき、 透水量係数の不均質場を発生させた後に、透水量係数が開口幅の3乗に比例するという3乗則により開口幅の不均質場に変換 した。相関長の異なる不均質場を10通りずつ発生させ、それぞれについてレジンの浸透解析を実施した。その結果、透水性の 高い部分を選択してレジンが浸潤していく様子が見られた。また、同じ相関長を有する不均質場においても、不均質場により 平均的な浸潤半径に差異が見られ、注入点の近傍の透水性が高い不均質場ほど平均的な浸潤半径が大きい傾向があった。相関 長の長い不均質場の方がやや遠くまで浸潤する傾向が見られたが、これは透水性の高い水みち部分の連続性が高いためと考え られる。

4.6 まとめ

国内サイトで得た岩石コアに対して、医療用 X 線 CT スキャナによる非破壊観察、マイクロフォー カス X 線 CT スキャナによる非破壊観察、および平面研削と研削面の撮影を繰り返して三次元的な情報 を取得する Grinding Tomography 法を適用した。

医療用 X 線 CT 画像から作成した割れ目の 3 次元可視化画像は、割れ目面に粒状の未充填箇所が観察された。これは割れ目の近傍に存在する黒雲母が、X 線 CT の特性である部分体積効果により実態よりも大きく認識されたことが原因であることが分かった。その点を除けば、概ね割れ目分布の傾向は実態を表現したものであり、医療用 X 線 CT スキャナの撮影速度を考えると、同スキャナでの撮影は必要不可欠であると考えられる。

マイクロフォーカス X 線 CT 画像から作成した割れ目の 3 次元可視化画像は、装置の有する優れた 空間分解能が反映された結果が得られ、医療用 X 線 CT 画像では識別が困難であった微細な割れ目や、 鉱物脈の分布などを鮮明に可視化できることがわかった。しかし、医療用 X 線 CT に比べて時間分解能 が劣ること、今回撮影に用いた岩石コアのサイズを撮影する場合には X 線の出力を上げなければなら ず、密度分解能(コントラスト)が悪い画像になるなどデメリットがあることも確認された。

- 4-104 -

Grinding Tomography 法による割れ目の3次元可視化画像は、研削方向の分解能が他の手法に比べ 格段に劣るため、その信頼性は低い。ただし、X線 CT 法では識別できない鉱物の分布形態や割れ目と 鉱物との相関関係など多くの利点を有する。また、これまで同手法は、加工(研削)に多大な労力が かかること、可視化技術が未発達であったことなどにより敬遠されてきたが、加工と撮影が自動に行 える装置が開発されるなど、従来の認識が変わりつつある。加工と撮影が自動に行える装置を導入す ることが予算的に難しい状況ではあるが、仮に導入できた場合に備えて可視化技術を整備することに は重要であると考えられる。

1 mm 間隔で研削した画像から割れ目の開口幅の測定も行った。開口幅の平均値は 0.18 mm であり、 接触率も 13.56%と評価された。HR-BTV 画像から算出された開口幅と調和的であり、割れ目が連続し て開口していない部分的な開口となっているという解釈を裏付ける結果が得られた。また、閉塞と判 断した箇所の多くは、上下盤が密着している部分よりも鉱物が充填している部分が多く、レジンや地 下水といった流体がこの鉱物充填の隙間を通って流れていると解釈できる結果も得られた。

原位置レジン注入方法を国内サイトで実施する前段階として、既往の研究を調査・整理した。その 結果、2台のポンプで主剤と硬化剤を別々に送り出し、主剤と硬化剤が交わる吐出口先端にスタティ ックミキサーを取り付けることで、均一に混合できる装置を使用することが最適であることがわかっ た。選定中のレジンについても、スイスのグリムゼル試験場で使用したレジンと粘度に関して比較し た結果、十分な性能を有することが確認できた。

原位置において注入するレジンの選定のためレジン2種(SS#1とEP-400M)の特性を把握するため の室内試験を行った。レジンの可使時間を計測したところEP-400Mは89-90分程度、SS#1は76分程 度であり、フルオレセインやナフチオンナトリウムなどの蛍光剤を添加しても可使時間はほとんど影 響しない。また、蛍光剤を添加した場合、僅かに粘性が低下する傾向がある。しかしながら、可使時 間、粘性の変化のプロファイルを詳細に見た場合、むしろ試験時の室温の変化による影響が大きく、 蛍光剤の添加による僅かな変化を定量的に得ることはできなかった。主剤と硬化剤の混合後のレジン の特性は温度環境に敏感であり、今後、恒温室などで実験することも必要であることが分かった。

主剤と硬化剤の混合後のレジンが水の存在によって、硬度や接着強度に与える影響を調査した。デ ュロメータを用いた硬度試験では SS#1 と EP-400M ともに 9 日目で最高硬度を発現したが、水分がある 場合は僅かに硬度が小さくなる傾向が認められた。一方、蛍光剤の影響は有意に認められなかった。 レジンの接着強度を引き剥がし試験により評価した。試験は上下盤に花崗岩の盤石を使い、両者間の 1mm の隙間にレジンを注入し、硬化後に引き剥がした。試験ではレジンが破断し、付着強度が定量的 に得られることを期待したが、蛍光剤の有無に関わらず、気中で養生した試験体の多くは接着面でな い岩石個所で剥がれ、接着強度が得られなかった。水中で養生したレジンを用いた試験の一部は、SS#1 のみが接着面で剥がれことから、少なくとも水中養生の SS#1 は気中で養生した SS#1 より接着力が弱

- 4-105 -

く、また気中・水中に関わりなく EP-400M も接着力が弱いことが定性的に評価することができる。今回の試験ではレジンの定量的な接着力が得られなかったため、今後接着強の度試験方法について再検討することを今後の課題としたい。

昨年度、今年度のレジンの特性試験から、これまで検討したレジンの中では、EP-400 が最も実際に 原位置で使用する可能性の高い。このため、EP-400M を原位置での注入した際の挙動を予備的に数値 解析により評価した。

解析では水平な単一割れ目を想定し、浸透特性を評価した。割れ目を一様な開口幅を有する平行平 板と仮定した解析では、開口幅の狭い割れ目ほどレジンの浸潤速度は遅くなる。主剤と硬化剤を混合 したレジンは、注入開始から約 10,000 秒後には硬化してしまうために、それ以降レジンは浸潤しなく なる。レジンの注入圧を大きくすれば、開口幅の狭い割れ目にも注入が可能であるが、割れ目に充填 物がある場合には充填物を移動させてしまい、本来の水理的な場を変えてしまう可能性ある。そのた め、原位置試験では、高い注入圧力を避け、複数の孔からレジンを注入することも検討する 必要があ る。

開ロ幅が一様でない不均質な割れ目を対象とした浸透解析では、透水性の高い部分を選択してレジンが浸潤していく様子が見られた。また、注入点の近傍の透水性が高い不均質場ほど平均的な浸潤半 径が大きい傾向があった。

今後は、室内で岩石コアや模擬割れ目に対する浸透試験を行い データを蓄積し、原位置での実証 試験に繋げたい 参考文献

- 安藤生大、大森聡一、小笠原義秀、Noblett, J.B. (1995): AVS による岩石組織の 3 次元観察の試み ーマグマ混合した岩石の実例一、早稲田大学情報科学研究教育センター紀要, 20, 12-23.
- 太田久仁雄、W.R.Alexander (2001):結晶質岩を対象とした放射性核種の移行・遅延モデルの構築と 妥当性評価-Nagra/JNC 原位置試験研究の概要-,サイクル機構技報 No.11.
- 核燃料サイクル開発機構(1999): 釜石原位置試験総括報告書, JNC TN7410 99-001.
- 長久、野口義文、森田誠也、中村直昭(1990):物質移動試験の準備調査と試験設計, PNC TJ4380 90-003,

動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書,日鉄鉱業株式会社.

- 長久、野口義文、森田誠也、中村直昭、岩崎浩、堀田正國、穂刈利之(1991): 花崗岩における原位 置試験(平成 2 年度), PNC TJ1380 91-001, 動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書, 日鉄鉱業株式会社.
- 土、山明、上杉健太郎、中野司(2000):高分解能 X線 CT 法による岩石・鉱物の 3 次元構造の研究-太陽系初期物質とコンドリュールー,地学雑誌, 109, 845-858.
- 鐵桂一、澤田淳(2005):研削した岩体亀裂開口部の観察による開口幅の測定 NETBLOCK 試験報告 -、 サイクル機構技術資料、JNC-TN8430-2005-001.
- 鐵桂一、澤田淳(2008):研削により測定した 50cm スケール岩体中の天然亀裂の形状に関する研究、日本原子力研究開発機構技術資料、JAEA-Research 2008-079.
- 鐵桂一、澤田淳(2010):研削により測定した 50cm スケール岩体中の天然亀裂の形状と開口幅の分布に 関する研究、日本原子力研究開発機構技術資料、JAEA-Research 2010-041.
- 動力炉・核燃料開発事業団(1994): 釜石鉱山における地層科学研究-第1フェーズ総括報告書-, PNC ZN7410 94-022.
- 新見健、野口義文、堀田正國(1992):花崗岩盤における割れ目内流れに関する基礎的研究,第 24 回岩盤シンポジウム講演論文集, 21-25.
- 物質 材料研究機構 (2011) : http://www.nims.go.jp/news/press/2011/03/p201103030.html, (2011.03.03)
- 松岡永憲(1996):原位置レジン注入システムの設計・製作, PNC TJ7439 96-006,動力炉・核燃料開 発事業団 契約業務報告書,大成基礎設計株式会社.
- 松岡永憲(1997):原位置レジン注入システムの設計・製作, PNC TJ7439 98-001,動力炉・核燃料開 発事業団 契約業務報告書,大成基礎設計株式会社.
- 山本肇、下茂道人、山本卓也(1998):試錐孔間水理試験装置を用いた水理学的調査・試験研究, PNC TJ1205 98-005,動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書,大成建設株式会社.

Alexander, W.R., Ota, K. and Frieg, B., (2003): The Nagra-JNC in situ study of safety relevant
radionuclide retardation in fractured crystalline rock II: the RRP project methodology development, field and laboratory tests. Nagra Technical Report NTB 00-06, Nagra, Wettingen, Switzerland.

- Alexander, W.R., Ota K. and Frieg B. (eds.), (2009): The Nagra-JNC in situ study of safety relevant radionuclide retardation in fractured crystalline rock III: The RRP project final report. Nagra NTB 00-07.
- Birgersson L, Gale J, Hakami E, (2000a): Äspö Hard Rock Laboratory. First True Stage, Pilot Resin experiment. Summary report. SKB IPR-00-04.
- Birgersson L, Gale J, Hakami E, (2000b): Äspö Hard Rock Laboratory. First True Stage, Pilot Resin experiment. Background information. SKB IPR-00-05.
- Frieg, B., Alexander, W.R., Dollinger, H., Bu"hler, C., Haag, P., Mo"ri, A. & Ota, K. (1998) In situ resin impregnation for investigating radionuclide retardation in fractured repository host rocks, J. contam. Hydrol., 35, 115-130.
- GIRI (2013): http://giri.princeton.edu, (2013.02)
- Hakami E, Gale J, (1999): Äspö Hard Rock Laboratory. First TRUE Stage pilot resin experiment. Pore space analysis. SKB IPR-99-14.
- Ketcham, R.A. and Carlson, W.D. (2001): Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences, Computers & Geosciences 27, p. 381-400.
- Maloof, A.C., Rose, C.V., Beach, R., Samuels, B.M., Calmet, C.C., Erwin, D.H., Poirier, G.R., Yao, N. and Simons, F.J. (2010): Possible animal-body fossils in pre-Marinoan limestones from South Australia, Nature Geoscience, 3, pp. 653-659, doi:10.1038/ngeo934.
- Winberg A, Andersson P, Hermanson J, Byegård J, Cvetkovic V, Birgersson L, (2000): Aspö Hard Rock Laboratory. Final report of the first stage of the tracer retention understanding experiments. SKB TR-00-07
- Winberg, A., (2010): Fault Rock Zones Characterisation Final report. TRUE-1 Continuation Project. SKB TR-10-36.
- Abelin. H., I. Neretnieks, S. Tunbrant, and L. Moreno (1985): Final report of the migration in a single fracture -Experimental results and evaluation. OECD/NEA International Stripa Project. Stripa Technical Report TR 85-03.

5. 適用性試験場の地質環境調査

5.1 はじめに

本事業において開発した各種調査技術を、平成 20 年より割れ目の分布が比較的単純なスイスの Grimsel Test Site に適用し、平成 24 年度までに技術の有効性をほぼ確認することができた。次の目 標は、日本国内の岩盤に対してもこれらの技術が適用できることを示すことである。本章では、適用 性試験場として選んだ独立行政法人日本原子力研究開発機構 瑞浪超深地層研究所の深度 300m 付近に 分布する中~粗粒土岐黒雲母花崗岩を対象にした地質環境調査について報告する。

5.1.1 瑞浪超深地層研究所の研究施設の概要

超深地層研究所計画は、独立行政法人日本原子力研究開発機構(JAEA)により進められてきた結晶 質岩と淡水系地下水を対象とした深地層の研究施設計画である。瑞浪超深地層研究所の研究坑道につ いては、平成20年度までに深度300mにボーリング横坑および研究アクセス坑道が完成し、平成24年 度までに立坑部は深度約500mまで達している。瑞浪超深地層研究所の位置と研究坑道の構造図を図 5.1.1-1に示す。本研究所周辺の地質は、基盤をなす後期白亜紀の土岐花崗岩体を新第三紀中新世の 堆積岩(瑞浪層群)が不整合で覆っている。瑞浪層群は下位より土岐夾炭累層、本郷累層、明世累層、 生俵累層に分けられる(糸魚川、1980)。研究所用地周辺における瑞浪層群の層厚は百数十mであり、 深度300mボーリング横坑は土岐花崗岩体中に建設されている(田上ほか、2009)。

5.1.2 深度 300m ボーリング横坑の概要

深度 300m ボーリング横坑の長さは換気立坑中心から約 20m であり、坑道高さ約 3m、坑道幅約 4m の 馬蹄形坑道である。また、端部から 5m は坑道高さが 3.8m、その底部は土岐花崗岩が観察できるよう に露出させている(図 5.1.2-1)。深度 300m ボーリング横坑は、主立坑脇の遮水性断層(S200_M_SHAFT) と南西側の遮水性断層(S200_13 および S200-13-2) に囲まれた比較的割れ目の多い上部割れ目帯に 掘削されている(石橋ほか、2010)。ただし、主立坑脇の遮水性断層の北東側に比べて、緑泥石化が 顕著な領域は確認されていない。また、坑道掘削時の壁面観察から約北西方向の走向を示す割目が卓 越しており、数m 程度の連続性を有することが確認された。



図 5.1.1-1 岐阜県瑞浪市における瑞浪超深地層研究所の位置と地下研究施設

(JAEA 東濃地科学センターHP (https://www.jaea.go.jp/04/tono/index.htm) から引用し一部加筆)



図 5.1.2-1 深度 300m ボーリング横坑構造図

5.2 適用性試験場の地質環境調査概要

5.2.1 調査の目的

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

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

- 単一割れ目
- ・ 割れ目が 2~4m は連続していること
- 割れ目の透水量係数が 1×E-07m²/sec オーダー程度
- ・ 坑道壁面からの距離深度で 30m 以内(最大 50m)

深度 300m ボーリング横坑エリア周辺においては、ボーリング調査による透水試験データが少なく 割れ目の性状と透水性の情報が得られていない。このことから、トレーサー試験等の適用性試験場の 調査エリアは深度 300m ボーリング横坑とした。またこの中で、他のボーリング調査で乱されていな いことや、坑道掘削時の壁面観察結果等から西側壁面を選定した(図 5.2.1-1)。



図 5.2.1-1 深度 300m ボーリング横坑における調査エリア

5.2.2 調査項目

トレーサー試験装置等の適用試験を実施するのに適した割れ目を検出することを目的とし以下の調 査を実施した。なお、実施フローを図 5.2.2-1 に示す。

- 各種検層およびトレーサー試験を実施するために大量湧水が確認された 12MI30 号孔と 13MI36 号孔、13MI37 号孔の孔底止水を行った。
- ・ 昨年度掘削した 13MI37 号孔の各種検層等を行った。
- 13MI37 号孔を用いた各種検層等と、新規に 1 本のボーリング掘削作業(14MI49 号孔) お よび各種検層を行った。



図 5.2.2-1 実施フロー

5.2.3 調査手順

- 5.2.3.1 ボーリング調査
 - (1) ボーリング掘削位置の設定

14MI49 号孔の掘削位置および、方向については、12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔、13MI37 号孔の調査結果(割れ目の分布および、走向傾斜)と周辺の観測設備設置状況等を考慮して決定した。

(2) 主要ボーリング資機材

図 5.2.3-1 にボーリング作業で使用した主要資機材の一覧示す。図 5.2.3-1 にボーリングマシン を、図 5.2.3-2 に孔口部の 4 インチケーシングを、図 5.2.3-3 にボーリングロッドを、図 5.2.3-4 にボーリングビットを示す。



図 5.2.3-1 ボーリングマシン (東邦地下工機製 D2-K 型)



図 5.2.3-3 ボーリングロッド



図 5.2.3-2 4インチ孔ロケーシング



図 5.2.3-4 ボーリングビット (右からΦ86mm,101mm,140mm)

品名	型式	数量	単位	寸法 (H×W×L)	重量		備考
ボーリングマシン	東邦地下工機 D2-K-92	1	台	1570 × 870 × 1546	750	Kg	能力 250m モーター含む(7.5kW)
ボーリングポンプ	東亜利根 NAS-2	1	台	670 × 480 × 1600	190	Kg	最大圧力 3Mpa モーター含む(3.7kW)
日鋼	150H × 3.0m	2	本	30kg/m	180	Kg	ボーリングマシン架台用
日錮	100H × 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	6	本	8kg/m	48	Kg	
ロッド類	NQ ロッド × 0.5m	2	本	8kg/m	8	Kg	
ロッド類	T40.5 ロッド × 0.3m	1	本	5kg/m	1.5	Kg	検層用
ロッド類	T40.5 ロッド × 1.0m	1	本	5kg/m	5	Kg	
ロッド類	T40.5 ロッド × 0.5m	1	本	5kg/m	2.5	Kg	
コアチューブ	ф 86mm	1	本	L=1.5m	7	Kg	掘削用 インナーチューフ [*] 1.0m
ケーシング類	¢114.3mm × 1.5m	4	本	L=1.5m	6	Kg	掘削用 インナーチューフ [*] 1.0m
タンク類	サクションタンク (掘削用)	1	台	600 × 600 × 1220			鉄製
タンク類	清水タンク	1	台	760 × 870 × 1070			掘削水貯水用
タンク類	排水タンク(排水貯水用)	1	台	760 × 870 × 1070			排水貯水用
タンク類	ドラム缶	1	台				トレーサー作液用
タンク類	半ドラム缶	1	台				孔口出口 中継用タンク
足場パイプ	¢48.6mm L=3m	10	本	2.5kg/m	25	Kg	
足場パイプ	∮48.6mm L=2.5m以下	30	本	延べ 30m	75	Kg	
クランプ	∲48.6mm(直交、 自在)	60	個	0.5kg/個	30	Kg	
水中ポンプ	1 吋 100V 用	2	台		50	Kg	
ホース類	1-1/2 吋 サクションライ ン	1	本	5m	3	Kg	
ホース類	1 吋 デリベリライン	1	本	10m	10	Kg	
ホース類	2 吋 サニーホース	1	本	50m	30	Kg	
道具類・吊り具類	スイベル、ケーシングバンド、 パイプレンチ・滑車	1	式		150	Kg	
孔口装置	メインハ゛ルフ゛、フ゜リヘ゜ンタ゛ー	1	式		100	Kg	

表 5.2.3-1	主要ボーリング機材一覧表
X	

(3) 資機材の搬入・仮設

深度 300m ボーリング横坑における作業区域および、予備ステージ側の仮置き場区域の概念図を 図 5.2.3-9 に、資機材の配置および掘削時の掘削水の給排水ルート概念図を図 5.2.3-10 に示す。 深度 300m ボーリング横坑のピット内に掘削水が流出しないようにピットのグレーチング部はシー ト養生した(図 5.2.3-5)。

ボーリング掘削の際に孔口から出る掘削水は、スライム溜め用ドラム缶や掘削水用タンク(図 5.2.3-7)を継由させ、スライムを分離した後、試錐ポンプから再度送水し、掘削水として再利用 した。また、湧水で掘削水が増加した場合は、A 工区排水ピットへ排水した。排水量は電磁流量計 (図 5.2.3-8)で計測した。



図 5.2.3-5 シート養生状況



図 5.2.3-6 掘削水量の計測状況



図 5.2.3-7 掘削水用タンク



図 5.2.3-8 排水側の電磁流量計



図 5.2.3-9 深度 300m ボーリング横坑作業区域概念図



図 5.2.3-10 ボーリング資機材配置および掘削水の給排水ルート概要図

(4) ボーリングの孔口測量

BM (Bench Mark) 点 (図 5.1.2-1) を基準に光波測量によりボーリング位置座標を計測した。
 (5) ボーリング掘削および孔曲がり検層

a. ボーリング掘削の概要

掘削は二重管普通工法(外径 86mm、コア径: 72mm)で坑内湧水を用いた清水掘削とした。

掘削編成は、ビット(外径 86mm) ×コアチューブ(二重管) ×センターリーマー×ロッドを基本 編成とし、多量のスライムが発生した場合はマッドチューブ、セジメントチューブを使用すること とした。また、坑内レイアウトの制約から 3.0m のロッドが使用できないため、0.5m、1.0m、2.0m のロッドを使用することとした。ビットはインプリタイプを使用した。

掘削によって発生したスライムは、土嚢袋等に集積し、産業廃棄物として適切に処分した。

b. 1段目(坑道掘削損傷領域部)の掘削

坑道周辺には、坑道掘削時に発生した掘削損傷領域(以下、EDZ と示す)が存在する。ボーリン グ掘削で発生する湧水が EDZ を介して逸水するのを防ぐため、ロ元~EDZ もしくは、ロ元~割れ目 が減少するまでの範囲にケーシングを設置した(1 段目掘削)。1 段目の掘削は、 ϕ 86mm でコア採 取したのち、孔内からの湧水対策として ϕ 101 mm→ ϕ 140mm で拡孔後、4 インチ孔ロケーシング(図 5.2.3-11)を設置した。ケーシング長は 5.0m を目安としたが、採取したコアの状況に応じて調整 して決定した。

4インチケーシングはセメントで岩盤に固定し、セメント固定後には孔内からの最大 3MPa の湧水 圧に対して十分な耐性を有することを確認するために加圧試験を行った。

一段目掘削(掘削から加圧試験まで)の手順を図 5.2.3-12 に示す。



図 5.2.3-11 孔口ケーシング仕上げ概念図







図 5.2.3-15 マニホールド設置状況



図 5.2.3-14 孔口ケーシング挿入状況



図 5.2.3-16 加圧試験状況

c. 2段目の掘削

2 段目の掘削は、φ86mmのダブルコアチューブを用いてコア採取しながら掘削を行った。掘削に 伴い、孔曲り検層を掘削長 5m 程度毎に 1 回の頻度で実施して孔曲り状況を確認した。孔曲り対策 としてφ86mm センターリーマー (図 5.2.3-17)をコアチューブに装着した。また、掘削では最大 3MPaの水圧を伴う湧水が予想されたため、突発性湧水発生時の孔口からの湧水突出を抑えるために、 孔口にはプリベンダーおよび、ゲートバルブからなる孔口装置を設置した(図 5.2.3-18)。



図 5.2.3-17 センターリーマー



図 5.2.3-18 孔口装置概要図

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

d. 掘削水のトレーサー(アミノG酸)濃度管理

ボーリング掘削や孔内洗浄等で使用する全ての水には、 $5mg/L(\pm 10\%)$ のアミノG酸を添加した。 アミノG酸を添加した掘削水は、掘削直前に横坑内に設置した掘削水用タンクで作成した。作成時 には分光蛍光光度計(日立製作所社製 F-2500 Fluorescence Spectrophotometer、図 5.2.3-19、表 5.2.3-2)により濃度管理を行い、アミノG酸の濃度が5mg/Lの $\pm 10\%$ 以内の範囲にあることを確認 した。

掘削のリターン水の蛍光染料濃度が指定濃度範囲外となった場合は、掘削を一時中断し蛍光染料 濃度を調整した。なお、湧水量が増え(2L/min 程度)、濃度調整が困難となった場合は、掘削水へ のアミノG酸の添加および濃度管理を中止した。

感度	S/N:800以上 (RMS) 水のラマン光:励起波長350nm、バンド幅5nm レスポンス2秒 S/N:450以上 (Peak to Peak)	波長スキャン 測定	励起/蛍光/同期スペクトル 繰り返し測定/CAT スペクトル補正 励起/蛍光側共220~600nm トレース、スケール変更、グラフ軸変換 ピーク・バレー検知			
最少試料量	感度 レスポンス2秒 S/N:450以上 (Peak to Peak) 水のラマン光:励起波長350nm、バンド幅10nm レスポンス2秒 最少試料量 0.6mL (標準10nm角セル使用時) 測光方式 単色光モニター比演算方式 光源 150Wキセノンランプ オゾン自己解消ランプハウス 測定波長範囲 動起、蛍光側共) 220~730nmおよび0次 (標準検出器) 220~800nmおよび0次 (オブション検知器使用時) バンドパス 2.5、5、10、20nm (励起、蛍光側共) 分解 2.5nm 波長精度 ±3.0nm以内		スムージング ファイル間演算(+, -, ×, ÷) 微分(1次~4次)			
測光方式	単色光モニター比演算方式		面積計算			
光源	150%キセノンランフ オゾン自己解消ランプハウス		トレース、スケール変更 微分(1次~4次)			
測定波長範囲 (励起、蛍光側共)	220~730nmおよび0次(標準検出器) 220~800nmおよび0次(オプション検知器使用時)	時間変化測定	レート演算 ファイル間演算(+, –, ×, ÷)			
バンドパス	2.5、5、10、20nm (励起、蛍光側共)		スムージング			
分解	2.5nm					
波長精度	±3.0nm以内		便重線(1,2,3次、折れ線)、係数入刀可 於見強!、			
波長走査速度	15、60、300、1500、3000nm/min		便重線トレース			
波長移動速度	約12000nm/min	定导测定	就計通見 割は7.3週空 サンプルブランク測定 ニーク約除			
測光値表示範囲	0.000~9999	足重例足	問込み 御足、リンフルフランク 御足、ケーラ 削除 ビーク比、ピーク 面積、 微分による定量			
データ処理部	PC : WindowsXP Professional		2,3波長演算			
プリンタ	WindowsXP 対応プリンタ		データ積算平均化			
大きさ/重量	幅500×奥行VI30×高さ270mm/35kg		感度の自動測定機能			
消費電力 (光度計本体)	AC100、115、220、230、240V 50/60Hz 400VA	その他	プリスキャン Microsoft Excelへのデータ転送、グラフコピー			
波長走查範囲	220~900mmおよび0次		印刷プレビュー機能			

表 5.2.3-2 分光蛍光光度計 (F-2500 Fluorescence Spectrophotometer) の仕様と機能



図 5.2.3-19 分光蛍光光度計 (F-2500 Fluorescence Spectrophotometer) と蛍光染料濃度計測状況

e. 孔曲り検層

孔曲り検層はボーリング孔の軌跡を確認することを目的とし、ケーシング設置後 5m 掘削ごとを 目安に実施した。測定器は村田製作所社製シングルショット SR 測定器を使用した(図 5.2.3-21)。 シングルショット SR 測定器は、時計と電池部分、カメラ部分、アングルユニット部からなり、掘 削方位、傾斜角、偏距具のフェイスを記録するフィルムディスクは特殊な耐熱フィルムで作られ、 坑底において撮影され、地上に引き上げてから4分以内で現像し記録が得られる装置である。



図 5.2.3-20 孔曲り検層状況(14MI49 号孔)



図 5.2.3-21 村田製作所社製シングルショット SR 測定器

- 5.2.3.2 コア観察
 - (1) コアの回収

コア回収の手順を以下に示す。

- ボーリング掘削により採取したコアは、坑内にてコアチューブから取り出し、コア表面に 基準線(図 5.2.3-22)を記入し、コア箱へ収めた。コアチューブからの取り出しおよび、コア 箱への収納時にはコアの上下方向やコア長の確認を行った。特にコア方向のとり違えを防止 するために、コア取り出し直後にコア下側に養生テープ等で目印を付けた。
- ② コアへの基準線記入作業は坑内で実施した(図 5.2.3-23)。基準線は、先に採取したコア との連続性を確認するための目印およびコアの上下方向取違い防止用とした。基準線は赤線 にて記入し、基準線から浅深度を上に見て、向かって右側へ1cm程度間隔を開けた位置に青 線を引いた。基準線を記入する際は、先に採取したコアがある場合はそのコアの下端と新た に採取したコアの上端を合わせ、連続線として記入を行った。また、基準線には記録上番号 を付与した。
- ③ コア箱は、1 箱に1列1m×3 列収納できる木製のコア箱を使用し、コアをコア箱へ収納す る際は、コア箱にビニールシートを敷いて極力コアが崩れないように収め、両横外外面には ボーリング孔名と収納深度区間を明記した(図 5.2.3-24)。
- ④ コアが採取できなかった部分があった場合は、相当する部分に深度を記入した発砲スチロール等をコア箱内に収めた。



図 5.2.3-22 コアへの基準線記入例



図 5.2.3-23 コアへの基準線記入状況



図 5.2.3-24 コア箱への収納状況

(2) コア記載

岩芯地質記載は、JAEAの岩芯地質記載要領に従い、以下の留意事項に注意し、1/20スケールでコア記載を行った。

- ① コア記載はコア箱を並べて行った。
- ② 観察に際しては、ボーリング日報を参照しながら実施し、特に掘削中に逸水や湧水が生じた箇所のコアについては入念に割れ目の状態を観察した。
- ③ コア記載は原則 1/20 スケールで行い、割れ目の多い箇所等により 1/20 スケールでは記載 できない場合は 1/10 スケール等に縮尺を変更し記載を行った。
- (3) コア記載の補足事項

コア記載は、JAEAの岩芯地質記載要領に準拠して実施したが、本マニュアルに示されていない細部の記載上の判断基準について以下に補足する。

a. 割目の角度

割れ目の角度は孔芯に直行する面と割れ目との交差角(孔芯と平行な割れ目が割れ目角度90°)で 表した。

b. 条線

図5.2.3-25に条線およびステップの計測の一例を示す。条線は、割れ目の走向線を基準とし、左 右下側に0~90°で記述した。図5.2.3-25(a)の例では「SL(L60)」と記述する。ステップ構造を持つ 場合は「ST(L60)」と示し、その形状から水平方向の移動センスを判断し備考欄に「右ズレ」また は「左ズレ」の記述を示した。



図 5.2.3-25 条線およびステップの計測の一例

c. 割目成因

割れ目の成因は、せん断による割れ目(Shear: S)、引張による割れ目(Tension: T)を次のように分類・記載した。

- ① 割れ目面に鏡肌・条線を伴う場合や明らかな変位が認められる場合および断層岩(断層ガ ウジ、断層角礫、カタクラサイト等)を伴う場合は「せん断による割れ目:S」と分類した。
- ② これに対し、上記の構造をもたず、岩盤のほぼ水平な初生構造(後述)に伴う剥離面は、 「引張による割れ目:T」と記載した。
- ③ 以上の判断がつかないケースでは、せん断あるいは引張による割れ目として、成因を「S or
 T」と記載した。つまり、断層やせん断節理が「成因 S」で、節理や断層に付随する割れ目が「成因 S or T」の割れ目となる。
- ④ 岩芯尻、リフター部分で破損した割れ目、コアチューブの中での回転等による「掘削誘発 割れ目 (Drilling induced fracture)」は成因を D(Drilling induced の略)として記載した。
 これは、新鮮な破断面で上下を密着・接合できる場合に限っている。
- ⑤ このほか、引張による割れ目か掘削時の割れ目かが判断できない場合があり、これは「T or D」と記載した。
- (4) 総合柱状図

コア観察結果から孔毎に総合柱状図を作成した。総合柱状図には、変質、岩盤等級、RQDおよび割 れ目の分布状況等を示した。以下にこれらの項目について補則する。 a. 変質

岩石が広範囲に被った変質の強弱についてバーで表示した。変質の強弱の基準は、記載マニュア ルの「割れ目沿いの母岩の変質」で基準とする個々の鉱物の評価方法を用いて、mスケール程度の 区間を総合的に評価した。

b. 割れ目沿いの母岩の変質

割れ目沿いに変質が認められた場合、セリサイト、緑泥石、粘土化等についての深度分布を示した。

c. 割れ目充填物

割れ目を充填する変質鉱物のうち、方解石、緑泥石、粘土等の深度分布を示した。

d. 割れ目密度

コア観察時に分離している割れ目の本数を示した。構造性の割れ目と掘削中の破壊による割れ目 とを区分して示した。

e. 割れ目角度別密度

1m毎の割れ目本数を30度区切りの角度別に示した。割れ目の角度は孔芯に直行する面と割れ目との交差角で表したものである。

f. 割れ目成因別密度

1m毎の割れ目本数を成因別に示した。

g. 断層岩及び断層岩の幅

断層岩を断層ガウジ、断層角礫およびカタクラサイトに区分し、その深度分布と断層岩の幅につ いて示した。

(5) コアの写真撮影

コア写真撮影の手順を以下に示す。

- ① コア記載を行う前に写真撮影を実施した。
- ② コア写真撮影にはデジタルカメラ(1200 万画素以上)を使用し、図 5.2.3-26 に示すコア写 真撮影台を用いて写真撮影を行った。
- ③ コア写真には孔番と深度表示を行い、カラーチャートをつけた状態で写真撮影を行った(図
 5.2.3-27)。



高さ1.8m×幅2.0m×奥行1.0m 図 5.2.3-26 コア写真撮影台

図 5.2.3-27 コア写真状況の一例

(6) コアの収納

コア写真撮影およびコア記載の際に取り出したコアは、作業終了後速やかにコア箱へ収納した。

5.2.3.3 キャリパー検層

キャリパー検層(X-Y 孔径検層)は、孔径の変化を深度に対して連続的に測定記録し、孔内における空洞、崩壊の位置やその形状・程度を把握できるほか、その検層結果は、孔径による補正を必要とする他の検層結果の解釈等に用いられる。

孔径検層に用いられる測定器は、地上(ここでは、深度 300m ボーリング横坑坑道内を示す)から の遠隔操作により測定用アームの開閉を行う。測定はアームを閉じた状態で孔内に測定器を降下し、 測定区間の最深部となる箇所でアームを開き、測定器を捲き上げながら、孔壁の凹凸によるアームの 開閉状況から、孔径の変化を測定した。

一般に破砕帯や断層、軟弱地質においては、孔壁が崩壊し易く孔径拡大が顕著に認められる。また、 孔径検層から得られた測定値より孔内容量等を算出し、セメンチング作業の情報として利用する事も できる。

表 5.2.3-3 にキャリパー検層装置の性能を、図 5.2.3-28 にキャリパー検層装置を、図 5.2.3-29 キャリパー検層装置の挿入状況を、図 5.2.3-30 にキャリパー検層装置のアーム部を示す。

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

表 5.2.3-3 キャリパー検層装置の性能一覧表

※ 深度測定プーリーユニットの精度



図 5.2.3-28 キャリパー検層ツール



図 5.2.3-29 キャリパー検層状況



図 5.2.3-30 キャリパー検層装置のアーム (開いた状態)

5.2.3.4 BTV・フローメータ検層

(1) 装置概要

ボアホールテレビ(以下、BTV)検層は、電力中央研究所で開発した BTV 機能付きフローメータ検 層装置を用いて、孔口マニホールドの先端深度から孔底までの範囲で実施した。BTV カメラで撮影 した孔内壁面画像を BIP システムにより画像解析し、各孔の岩盤分離面について、深度、方向(走 向・傾斜)、区分、開口幅または充填幅、分離面形状および、状態を記載した。

BTV 機能付きフローメータ検層装置は、BTV カメラを装備しており、検層と同時に孔壁の状況を観察可能である。BTV カメラは、㈱レアックス社製の BIP システムを使用した。

表 5.2.3-4 に BTV カメラの性能示す。

フローメータ検層装置は、検層プローブ部(フローメータプローブ、BTV カメラ、ケーブル)、 地上コントロール部(ウィンチコントローラー、ケーブルドラム)、地上計測部(パソコン、ビデ オデッキ等)によって構成される。

検層プローブ部はボーリングロッドに接続し、孔内の移動はボーリングマシンを使用した。セン タライザーは、検層プローブ部を孔中心に保つためのツールである。センタライザーおよびラバー ディスクは、プローブ移動時のスポンジパッカーの摩耗を低減する効果がある。

フローメータプローブのスポンジパッカーは、地下水を流速センサー部へ効率よく誘導し、また センサーを孔内中央部に保つ機能がある。表 5.2.3-5 にフローメータ検層装置の性能を、図 5.2.3-31 にスポンジパッカーの機能を示す。また、BTV・フローメータ検層装置全体の検層装置の概要図を 図 5.2.3-32 に示す。

表 5.2.3-4 BTV カメラの性能一覧表

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

※ 深度測定プーリーユニットの精度

表 5.2.3-5 フローメータ検層装置の性能一覧表

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

※ 流速測定範囲は流量計単体としての性能







図 5.2.3-32 BTV・フローメータ検層装置の概要図

- (2) BTV 検層
- a. 検層準備

測定開始の直前にボーリング孔内を洗浄した。

b. 撮影準備

撮影準備として、外部装置に孔内に挿入する測定プローブを接続し、通電して機材の動作確認を 行った。

機材動作の確認後は、測定プローブをボーリング孔内に挿入し(図 5.2.3-33)、押し込みに使用 するロッドをプローブに接続し、孔内が測定可能な状態にあるかどうかをモニター上で確認した。



図 5.2.3-33 測定プローブ (BTV・フローメータ)の挿入状況

c. 孔壁画像撮影

モニター上で孔壁が十分に撮影可能な状態にあることを確認した後、孔壁画像撮影を開始した (図 5.2.3-34、図 5.2.3-35)。

撮影された画像は、MOディスクまたは、ハードディスクにデジタル情報として記録し、VTR 装置 によりバックアップ画像として記録した。

孔壁画像撮影は、プローブに接続したロッドを、ウインチまたは人力により孔底まで押込み、孔底より低速(1.5m/min以下)で引き抜くことにより行った。



図 5.2.3-34 BTV・フローメータ検層状況



図 5.2.3-35 BTV 孔壁画像取得状況

d. 記録データの確認・機材回収

孔壁画像撮影の終了後、取得データ(VTR 他)の精度や確度等の最終確認を行い、機材を回収して解体を行った。

(3) フローメータ検層

a. フローメータ検層の実施概要

フローメータ検層は、前述した BTV 機能付きフローメータ検層装置を用いて、孔ロマニホールド の先端深度からから孔底までの範囲で 1m 毎に流速を計測した。計測に際しては孔口からの湧水量 とフローメータから得られた流量を確認し、ダイバーターの効果を確認して作業した。

流速変化(アノマリー)が得られた深度では、BTV 機能を用いて割れ目を確認しながら測定間隔 を調節し割れ目との関係を調査した。

b. フローメータ検層の実施手順

フローメータ検層は BTV 検層の後に実施した。ボーリング孔の孔口から孔底にかけては BTV 検層 を実施、孔底から孔口にかけてはフローメータ検層を実施した。実施手順は次のとおりとした。

(a) 検層準備

孔口に検層装置を設置し(図 5.2.3-32)、孔口からの湧水量とフローメータから得られた流量を 確認し、ダイバーターの効果を確認した。

(b) 検層の実施

検層の実施手順としては、以下に示すとおりである。

- キャリブレーション用の湧水量を測定する。
- 所定の深度まで検層装置を挿入する。
- ③ 検層装置を静止させ、流量測定値が安定するまで待機し、安定後の数値を記録する。
- ④ 以後、1mごとに上記手順(静止から測定)をケーシング下端部まで繰り返す。
- (c) 記録データの確認

フローメータ検層の終了後、取得データの概算換算流量とキャリブレーション用湧水量を比較し 測定結果を確認した。

5.2.3.5 透水試験(単孔式、孔間)

透水試験数は、1 孔当り 6 カ所程度を基本とし、深度、試験方法等については、掘削時の水圧応答、 フローメータ検層および BTV からの情報を基に設定した。

単孔式透水試験は、間隙水圧の安定を待たずにパッカー拡張後から定圧揚水を実施し、間隙水圧モ ニタリング結果から透水量係数を計算した。孔間透水試験は、間隙水圧モニタリングを翌朝まで行い、 間隙水圧の安定を確認した後に定流量ポンプ(モーノポンプ)を使用して定流量揚水試験を実施した。

- 5-23 -

(1) 透水試験の使用機器

表 5.2.3-6 に透水試験に使用する機器を示す。

分類	装置	主要部品数量等	仕様
了内却	パッカーユニット	3 台	スライド式 適用孔径φ86mm
リロトリロり	ストレーナ	ステンレス製ガス管	3/4"ガスネジ
	IFT IT w K	長さ:2m および 1m	外形φ42.7mm 内径φ35.8mm
	JIIE	ステンレス製	連結部φ49.0mm
中継部	パッカー用	約 50m	ナイロン製 4×2.5mm
	チューブ	(切断可)	最高使用圧力 3.7MPa
	圧力用チューブ	11	11
	電磁流量計	1台	MAX:30L/min 精度 FS:0.1%
	モーノポンプ	1台	MAX:2L/min
	データ収録用 PC	ノートパソコン	
地上部	データロガー	キーエンス NR1000	
	チャンバータンク	3 台	パッカー拡張用
	圧力計	3 台	ひずみ型 MAX:3MPa
	ロ元バルブ	1 台	ボールバルブ

表 5.2.3-6 透水試験使用機器一覧表

(2) 透水試験方法

a. 装置構成と機能・役割

調査現場は、深度 300m の坑道内に位置しており、常時ボーリング孔から地下水が湧水する状況に あるため、孔内に設置する装置は湧水を想定して圧力計やバルブ等の部品を孔外に配置するシンプ ルな構造とした。透水試験装置は、ロ元パッカーを含めたトリプルパッカー式であり試験区間の水 圧 P2、試験区間より下方の水圧 P1 および、試験区間上方の水圧 P3 が同時に観測できる装置を使用 した。

図 5.2.3-36 に透水試験の装置設置の概念を示す。



図 5.2.3-36 透水試験装置の設置概念図

以下に透水試験装置の各主要機器の役割を示す。

① パッカー

パッカーは、ロ元パッカーを含めたトリプルパッカー式であり拡張して遮水域を設置するこ とで試験区間を形成する。拡張は、パッカー拡張用タンクの水を高圧窒素ガス等で加圧して行 う。パッカー圧力はタンクに取り付けたブルドン管圧力計で確認する。

② FT ロッド/ストレーナ

ロッドは、継手部は0リングによるシール機能を有する。パッカー挿入ツール・挿入尺度と しての役割、および透水試験時の導水パイプとして利用する。ストレーナは、試験区間のパッ カー連結ツールとして使用する。穴あきパイプ使用し、ロッド(孔外)と試験区間の導水を可 能とする。

③ 圧力ライン(圧力計測用チューブ)、パッカーライン(パッカー拡張用チューブ)

P1、P2、P3 圧力計用と3本のパッカー用共に内径2.5mmのナイロンチューブを使用した。ロッドに抱き合わせて挿入し、各計測区間に繋がる圧力チューブは、地上の圧力計に接続し、パッカー用チューブは拡張用タンクに接続する。チューブの耐圧性能は、内圧に対して4.47MPaである。

④ 口元バルブ

ロッドロ元に手動のボールバルブを設置し、試験区間からの流路の開放/閉鎖を行う。透水 試験の開始・停止等の主要な役割を担う。

⑤ 圧力計

圧力ライン(圧力計測用チューブ)の先端に取り付け、P1、P2、P3 試験区間の水圧を計測する。圧力データはデータロガーを介してパソコンに記録される。

⑥ パッカー拡張用タンク

パッカー拡張用の耐圧水タンクで、耐圧性能は 5MPa である。タンク内の水位を目視確認で きる目盛りを取り付けており、タンク内の残水量が把握できる。

⑦ データロガー

圧力データ、流量データ(使用時)を処理する。

⑧ データ収録 PC

圧力データ、流量データを収集、保存、グラフ表示を行う。

⑨ モーノポンプ

定流量揚水試験を実施する場合に使用し、ローターの回転数を一定にして定流量制御を行う。 モーノポンプの仕様を表 5.2.3-7 に示す。

⑩ 電磁流量計

流量の経時変化を記録する。定圧揚水試験を実施する場合に使用する。

項目	性能
形式	9NE10型(兵神装備株式会社製)
流量制御範囲	100 ~ 2000 mL/min
最大使用圧力	5 MPa
回転速度	27~600 /min
駆動機	インバータ制御モーター
	AC 200V/60Hz/三相
モーター電源	(インバータを介して供給)
インバータ電源	AC 200V/50Hz/単相

表 5.2.3-7 モーノポンプの仕様

b. 透水試験の手順

図 5.2.3-37 に一般的な透水試験フローを示す。

今回実施した単孔式透水試験は、湧水割れ目の特定とその割れ目の概略な透水量係数を求めるため、間隙水圧測定の安定を待たずにパッカー拡張後から定圧揚水試験とした。

孔間透水試験は、間隙水圧測定を翌朝まで実施した後に定流量ポンプ(モーノポンプ)を使用し て定流量揚水試験を実施した。なお、湧水量が少なく、定流量試験の実施が不可能(流量制御下限 (100mL/min)の都合で流量が安定しない等)な場合はパルス試験を実施した。



図 5.2.3-37 透水試験の基本作業フロー

図 5.2.3-37 のフローに示す作業の概要を以下に示す。

① 装置挿入

挿入は、深度間違いのないよう所定のロッド本数、パッカー編成および残尺を確認の上挿入 した。作業状況を図 5.2.3-38 に示す。

② パッカー拡張 (INF)

湧水圧による試験装置の浮き上がり防止のため、ロッド残尺部に固定したバンド等を介して、 レバーブロックでアンカーを取り、ロ元バルブを開放したままパッカーを拡張した。拡張の完 了は、圧力変化やタンクの水量より確認した。拡張圧力は、水圧+1.0MPa 前後とした。

③ 間隙水圧測定 (PSR)

ロ元バルブを閉鎖し、区間を完全閉鎖した時点から間隙水圧の測定を開始した。今回単孔式 透水試験においては、水圧安定までは確認せずに次試験へ移行した。

④ 定圧揚水試験(HW/HWS)

定圧揚水試験は単孔式透水試験で実施した。試験は試験区間のロ元バルブを全開放し、流量 制御を行わないで排水して湧水量を計測する。湧水量が約 50L/min 以下であれば、内管抵抗が 少なく実施可能と考える。

⑤ 定流量揚水試験 (RW/RWS)

定流量揚水試験は、モーノポンプ(図 5.2.3-39)をロ元バルブに接続し、試験区間から一定 流量で揚水している過程の水圧変化の計測と、ポンプ停止して後の水圧回復過程を計測する。 ⑥ パルス試験(PW)

パルス試験は、湧水量が少なく、定流量試験の実施が不可能の場合に実施した。試験は、ロ 元バルブを開閉して試験区間の圧力を減圧させ、その後の回復過程を計測する。

⑦ パッカー収縮 (DEF)

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

8 設置位置の移設

深度移設は、目的の位置までロッドの追加、あるいは抜管して行った。

⑨ 装置回収

試験後、装置を抜管した。



図 5.2.3-38 透水試験状況



図 5.2.3-39 定量試験用モーノポンプ

- c. 試験方法
- (a) 間隙水圧測定 (PSR)

パッカー拡張後、ロ元バルブを閉鎖して圧力ライン(測定ライン)のチューブ内のエア抜きを行った。エア抜き完了後、圧力計ライン末端に取り付けた圧力ラインバルブを閉じて区間を完全閉鎖し、本測定を行った。図 5.2.3-40 に間隙水圧測定方法の概念図を示す。



図 5.2.3-40 間隙水圧測定時の概念

(b) 定圧揚水試験(HW/HWS)

定圧試験は、排水水頭を一定として流量変化を測定する試験である。ロッドロ元のレベルは一定 であるため、ロ元バルブを全開放とすればそのまま定水頭となる。所定時間排水後は、バルブを閉 鎖して回復試験とした。図 5.2.3-41 に定圧試験方法の概念図を示す。



図 5.2.3-41 定圧試験の概念

(c) 定流量揚水試験/回復試験(RW/RWS)

定流量試験は、排水流量を一定に保ち圧力変化を測定する試験である。対象区間の湧水量に対し て、モーノポンプで定流量制御により排水量を調整して試験を行った。所定時間まで排水した後、 ポンプを停止し回復試験へ移行した。原則試験区間の水圧が初期圧まで収束、もしくは排水時間と 同じ時間経過をもって試験終了とした。透水係数は排水過程、回復過程のそれぞれより算出できる。 図 5.2.3-42 に定流量揚水試験方法の概念図を示す。



図 5.2.3-42 定流量揚水試験の概念

(d) パルス試験 (PW)

パルス試験は、水圧収束を測定する試験である。試験は、間隙水圧に対し水頭差(水位差)を与 えた状態で、ロ元バルブあるいは圧力ラインのバルブの開閉操作により区間を瞬間的に減圧させ、 試験初期の間隙水圧(以後、初期圧)への収束過程を測定する。原則初期圧まで収束すれば試験は 終了である。試験水頭差は、初期圧と操作したバルブ高さとの差となる。同試験は、試験に伴う水 の移動量が少なく、且つ水圧収束は早いので透水性の低い箇所での試験に適している。図 5.2.3-43 にパルス試験方法の概念図を示す



図 5.2.3-43 パルス試験の概念

d. データ整理・解析

圧力計により測定されたデータは整理した後に、各試験に対する解析を行った。

(a) 定圧揚水試験(HW)の解析

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

- ① ロ元バルブより湧水する地下水の平均湧水量を計測した。
- ② 試験開始前の P1 圧力を計測し、口元の圧力が 0 となるよう圧力値を水位に換算する。
- ③ 以下の式より透水量係数 T を算出する。

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

ここに、

T :透水量係数 (m²/sec)
 Δs : 水位低下量 (m)
 L :試験区間長 (m)
 Q :平均流量 (m³/sec)
 m :縦横方向の透水係数比 (通常は1)
 r :試錐孔半径 (m)

(b) 定流量揚水試験(RW)の解析

定流量試験は、Cooper-Jacob 法を用いて行う。図 5.2.3-44 に Log(t/r²) - s 曲線と Derivative Plot の例を示し、以下に解析手順を述べる。

- 「
 「対数グラフの対数目盛り X 軸に t (sec)を、算術目盛り Y 軸に初期水位からの水位低下量
 s(m)をとり、Log(t/r²) s 曲線を作成する。同時に、両対数グラフの X 軸に t (sec)を、Y 軸
 に水位低下量 s(m)、および Y2 軸に ds/dLn(t)をとり、Log(t/r²) s 曲線のプロットの傾き
 を示す Derivative Plot を作成する。
- ② Derivative Plot より、Log(t/r²) s 曲線の直線勾配に対応する時間の ds/dLn(t)は、ほぼ一定値を示す。これより、Log(t/r²) s 曲線の直線勾配を選定する。
- ③ 選定した Log(t/r²)-s 曲線の直線勾配の、1 サイクル間における水位差Δs(m)を求め、以下の左式より透水量係数を算出する。
- ④ Log(t/r²)-s曲線の直線勾配の延長が、Δs = 0と交わる点(t/r²)0(sec)を求め、以下の 右式より貯留係数Sを算出する。

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

ここに、

T :透水量係数 (m²/sec)
 S : 貯留係数 (-)
 Q : 平均流量 (m³/sec)
 Δs : Log(t)の1サイクル間における水位低下量 (m)
 (t/r²)₀ : s=0における経過時間 (sec)
 r :ボーリング孔半径 (m)



図 5.2.3-44 Log(t)-s曲線(左)、Derivative Plot(右)の例

(c) 回復試験の解析 (RWS)

RW 試験後の回復過程の解析は、貯留係数が得られる Agarwal 法の解析式を用いた。

図 5.2.3-45 に回復過程の Log(tp・Δt/(tp+Δt))-Sr 曲線、Derivative Plot の例を示し、以下 に解析手順を述べる。

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

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

ここに、

:透水量係数 (m²/sec) Т S : 貯留係数 (-) : Log(tp· Δ t/(tp+ Δ t))の1サイクル間における水位回復量 (m) ΔSr :試錐孔半径 (m) Γ_{w} : 平均流量 (m³/sec) Q $tp \cdot \Delta t/(tp + \Delta t)_0$: Sr=0 における tp · $\Delta t/(tp + \Delta t)$ (sec) *tp* : 湧水時間(湧水停止時間) (sec) △t : 回復過程(湧水停止後)の経過時間 (sec) *Ss* :比貯留係数 [=*S* / *L*] : 透水係数 $\begin{bmatrix} =T / L \end{bmatrix}$ k L :試験区間長(m)



図 5.2.3-45 Log(tp・Δt/(tp+Δt))-Sr曲線(上)、Derivative Plot(下)の例

(d) パルス試験 (PW) の解析

直線勾配法の orslev の解析式と、曲線一致法の Cooper らの解析式を用いた。

なお、解析式の選択は以下の通り行った。

- Hvorslev 法の t-Log(s) グラフが凹形状となる要因が岩盤の貯留性によるものであれば、 基本的には Cooper 法を採用。
- ② 貯留係数比 α が 1E-03 より大きい場合は、Cooper 法を適用し、小さい場合は、Hvorslev 法を適用。
- 1) Hvorslev の解析

Hvorslevの解析式は、貯留性の影響を受けていないと判断される場合に適用した。本式は、半無限の深さと幅の帯水層を仮定している。以下に解析手順を述べる。

- ① 片対数グラフの算術目盛り X 軸に時間 t (sec)を、対数目盛り Y 軸に平衡水位に対する水位 差 s (m)をとり、図 5.2.3-46 に示すような t-Log(s) 曲線を作成し、図中のプロットに直線勾 配が認められることを確認した。
- ② 得られた直線の任意の2点の座標から直線の勾配を求め、次式より透水係数を算出した。

$$k = \frac{(2R_w)^2 \cdot Ln(m \cdot L/r)}{8L(t_2 - t_1)} \cdot Ln(s_1 / s_2)$$

ここに、

k :透水係数 (m/sec)
R_y: ピエゾメーター管内半径 (m)
r :試錐孔の半径 (m)
m :鉛直方向の透水係数比(通常は1:等方性)
L :試験区間長 (m)
t :経過時間 (sec)
s :経過時間に対応する平衡水位との水位差 (m)
※注 パルス法の解析では仮想半径をピエゾメーター管内半径とする。



図 5.2.3-46 Hvorslevのt-Log s曲線

2) Cooper らの解析方法

Cooper らの解析式は、地盤の貯留性の影響を受けて t-Log(s)曲線に明確な直線がみられない時に適用した。以下に解析手順を述べる。

- 平衡水位に対する、試験中の水位差 s(m)と試験開始時の水位差 s₀(m)を求め、さらに水位 差比 s/s₀を求めた。
- ② 片対数グラフの対数目盛り X 軸に経過時間 t (sec)を、算術目盛り Y 軸に水位差比 s/s₀をとって、実測データを Log(t) s/s₀のグラフにプロットした。
- ③ 図 2.2.10-10 に示す標準曲線群を実測データと同じスケールで準備した。
- ④ 片方のグラフを時間軸方向(横軸)に平行移動させ、測定値と最も合致する標準曲線を選び、この標準曲線に対応するαと、任意の合致点に対応する時間軸座標β₀とt₀の値を読み 取り、次式より透水係数と比貯留係数を算出した。

$$k = \frac{R_w^2 \cdot \beta_0}{L \cdot t_0} \qquad Ss = \frac{R_w^2 \cdot \alpha}{L \cdot r_w^2}$$

ここに、

- *k* :透水係数(m/sec)
- *R*_w: ピゾメエーター管内半径(m)
- r_w:試錐孔の半径(m)
- *L* :試験区間長(m)
- Ss:比貯留係数(1/m)
- t_0 :時間(sec)
- α : 貯留係数によって変化する係数[=S· $(r_w/R_w)^2$]
- β_0 : 透水係数によって変化する係数[=T·t₀/ R_w^2]
- ※注 パルス法の解析仮想半径をピエゾメーター管内半径とする。



図 5.2.3-47 Cooper らの曲線一致法

5.2.3.6 間隙水圧モニタリング装置の設置および観測

間隙水圧モニタリング装置を図 5.2.3-48 と図 5.2.3-49 に、間隙水圧モニタリング装置の主な仕様 を表 5.2.3-8 に、設置例を図 5.2.3-50 に示す。

間隙水圧モニタリング装置は各種調査結果をもとに、トレーサー試験を実施するに適すると考えら れる割れ目が観測できるように設置した。



図 5.2.3-48 間隙水圧モニタリング装置 (孔内部)



図 5.2.3-49 間隙水圧モニタリング装置 (地上記録装置部)

大項目	項目	主な仕様				
	바쁘니죠	φ 76 mm (製作時)				
	装直外径	φ 86 mm (拡張時)				
パッカーユニット	装置長さ	1840 mm				
	最大使用差圧	1.5 MPa				
	拡張方式	 φ 86 mm (拡張時) 1840 mm 1.5 MPa 水拡張 φ 80 mm (製作時) φ 86 mm (拡張時) 440 mm 1.5 MPa 水拡張 パッカーラバー中央部にピストン式ポート付属 φ 76 mm (最大外径) 2000 mm, 1000mm 770mm, 1300mm (12MI30号孔) 270mm, 550mm, 1200mm (12MI31号孔) φ 6 × 4mm, 耐圧5.0 MPa φ 6 × 4mm, 耐圧5.0 MPa φ 4 × 2.5mm, 耐圧4.5 MPa 0~7,000 kPa (パッカー拡張圧計測用) 0~10,000 kPa (パッカー拡張圧計測用) 				
	바뀌니요	φ 80 mm (製作時)				
	装直外径	φ 86 mm(拡張時)				
パッカーー体型	装置長さ	1840 mm				
モニタリングユニット	最大使用差圧	1.5 MPa				
	拡張方式	水拡張				
	モニタリングポート	パッカーラバー中央部にピストン式ポート付属				
	装置外径	φ 76 mm (最大外径)				
П w K	装置長さ(定尺)	2000 mm, 1000mm				
	(1) 第一日 (1) (1) 第一日 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	770mm, 1300mm (12MI30号孔)				
	装直長さ(調登用)	270mm, 550mm, 1200mm (12MI31号孔)				
	間隙水圧測定用	φ 6×4mm, 耐圧5.0 MPa				
中継用チューブ	採水用	φ 6×4mm, 耐圧5.0 MPa				
	パッカー拡張用	φ 4×2.5mm, 耐圧4.5 MPa				
		0~7,000 kPa (間隙水圧計測用)				
	圧力計レンジ	0~10,000 kPa (パッカー拡張圧計測用)				
		0~200 kPa (気圧計測用)				
	圧力計精度	±0.1 %				
	流量計レンジ	0~2000 mL.min				
间隙水灶計測装直	法导动性由	±20 mL/min (流量 0~500 mL/min)				
	流重計有度	±4%以下(流量 500~2000 mL/min)				
	使用圧力範囲	5 MPa 以下				
	A/D計測ユニット	34980A (Agilent Technologies社製)				
	計測プログラム	最大80ch収録可能				

表 5.2.3-8 間隙水圧モニタリング装置の仕様一覧

間隙水圧モニタリング装置の設置深度例

	IN	Т8	IN	Т7	IN	T6	IN	INT5 INT4		<u>INT3</u>		INT2		INT1		
試験区間	上端*)	下端	上端	下端	上端	下端	上端	下端	上端	下端	上端	下端	上端	下端	上端	下端
深度mabh	5.070	5.835	7.035	7.530	8.080	8.180	8.730	17.605	18.855	19.350	19.900	20.000	20.550	21.045	22.245	30.000
区間長(m)	0.7	65	0.4	95	0.1	00	8.875		0.495		0.100		0.495		7.755	

・ 上端*) 孔ロマニホールドの設置先端深度とする。
・ 斜体 はパッカーー体型モニタリングユニットで区切った区間を示す。

孔ロマニホールド



図 5.2.3-50 間隙水圧モニタリング装置の設置例
5.2.3.7 ポイント希釈試験

ポイント希釈試験は、ボーリング孔に設置している間隙水圧モニタリング装置の観測区間で実施し た。

(1) ポイント希釈試験の概要

ポイント希釈試験は、試験区間内をトレーサー溶液で満たした後に自然の流速によりトレーサー 溶液が希釈される過程を計測することで自然の流動状態を把握するための試験である。

- (2) 試験手順
- a. 試験準備

試験の準備は以下の通り行った。

- トレーサー溶液の作成を行った。試験で用いるトレーサーはウラニンを使用した(13MI37 号孔で実施したポイント希釈試験ではウラニンとアミノG酸を混合したものを用いた)。ウ ラニン溶液の濃度は約3mg/Lとした。
- ② 蛍光セルの原位置で採水した地下水を用いて蛍光セルごとにキャリブレーション(検量線の作成)を行った。
- ③ 試験を実施する間隙水圧モニタリング装置の観測区間に繋がる揚水側と注水側のライン双方に蛍光セルを設置して、両セルの間にトレーサー置換タンクと循環用のポンプを設置した(図 5.2.3-51)。
- b. 試験手順

ポイント希釈試験は以下の手順に従い実施した。図 5.2.3-51 に作業の概念図を示す。なお、試験はトレーサー溶液が十分に希釈されるまで継続した。

- ① 孔内装置および地上配管のエア抜きを行い、トレーサー置換タンクにトレーサーを、地下 水タンクに地下水を充填した。
- ② プランジャーポンプ(PP)を用いて、試験区間と地上部配管内の地下水を一定の流量で循 環させ流れ場を形成した。
- ③ 配管内の流速が安定したことを確認した後、トレーサーが試験区間へ流れるようにバルブ を切り替え、トレーサータンク内のトレーサー溶液を試験区間の地下水と置換した。
- ④ C1、C2の蛍光濃度センサーの値が各々一定になることを確認した時点で、希釈試験を開始 するためにトレーサー置換タンクのバルブを循環側に切り替えた。その後、トレーサー濃度 が自然の地下水の流速で希釈される過程をC2蛍光センサーで計測した。









図 5.2.3-51 ポイント希釈試験の試験手順

5.2.3.8 高精度孔曲がり検層

高精度孔曲がり検層は間隙水圧モニタリング装置の設置前に、既存ボーリング孔 13MI37 号孔と新規 掘削した 14MI49 号孔において実施した。

検層には村田式デジタルオンラインシステム(図 5.2.3-52、方位センサー精度:±0.3°、傾斜センサー精度:±0.1°、分解能 0.01°)を用いた。当システムは 3 軸構成角速度センサー・磁気センサーを備えたプローブを孔内に挿入し、特定深度における傾斜角と方位角を計測して距離換算を行い、 孔の曲がり具合を確認するものである。

測定は孔口から孔底(プローブの計測最大深度で可)までを連続的に深度 50 cmごとに行い、3 次元 での孔跡を計測した。



図 5.2.3-52 村田式デジタルオンラインシステム(写真は動作確認時のもの)

5.2.3.9 ボーリング方向(方位角・傾斜角)の測量

今年度に実施した高精度孔曲がり検層はデジタルオンラインシステムを採用したが、平成25年度に 実施した高精度孔曲がり検層はジャイロ孔曲り計測によって実施した。

デジタルオンラインシステムは特定深度における傾斜角と方位角を計測する。これに対しジャイロ 孔曲がり検層は、ボーリング孔口を0点とし、0点を起点としてボーリング孔の方向をX軸、それに 直交するY軸、鉛直距離をZ軸とした軌跡を座標化することで孔跡を求める。

このため、ジャイロ孔曲がり計測では、ボーリング孔の掘削方向に誤差がある場合、その誤差を含 んだ結果となってしまう(図 5.2.3-53)。正確なボーリング孔の軌跡を描くためには正確なボーリン グ掘削方向(真の方向)を明らかにする必要がある。



図 5.2.3-53 掘削方向に誤差が生じた場合の方位角のズレについて

平成25年度はボーリング掘削計画の掘削角度を基準として掘削方向を算出したが、ボーリング掘削 の方向が計画から大きくずれていることも想定された。このため、今年度はジャイロ孔曲がり検層を 実施した12MI30号孔、12MI31号孔、13MI36号孔のボーリング方向の測量を行った。また、測量誤差 の程度を把握するために、13MI37号孔(デジタルオンラインシステムを用いて孔曲がり検層を実施) についてもボーリング方向の測量を行った。

ボーリング方向の測量は以下の手順で行った。

- (1) 方位角の測量方法
 - 各ボーリング孔に設置したモニタリング装置のロッド(孔口から1m程度突き出している)の天端に任意で2点の測量点を設置した。
 - ② 各ボーリング孔に設置した測量点の座標を光波測量で求め、方位角を算出した。
- (2) 傾斜角の測量方法(計算によるもの)
 - ① 方位角測量時に設置した測量点のレベル測量を行い、高さを求めた。
 - ② 2点の測量点の高さの差と座標距離から傾斜角を算出した。
- (3) 傾斜角の測量方法(実測によるもの)
 - 各ボーリング孔に設置したモニタリング装置のロッド(孔口から1m程度突き出している)の天端に角度測定器を当てて傾斜角を測定した。
- 5.2.3.10 高解像度 BTV 検層
 - (1) 装置の概要

ボアホール TV 装置は,株式会社レアックス社製 BIP-V を使用し,ボーリング孔の壁面観察をお こなった。本システムは、展開画像記録装置(以下 ODS)、詳細観察記録装置[以下 DVS(HR-BTV)] 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をおこな うことができ、DVS では、前方視カメラと側方視カメラの組み合わせにより割れ目の詳細な観察を おこなうことができる。

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 計測などの解析をおこなうことが可能である。

DVS により取得されたデータは、VTR に記録されるほか、現場で必要個所をキャプチャー記録す ることもできる。システム構成は図 5.2.3-54 に示すとおり、現場システムと室内システムから構 成される。その構成を以下に示す。



図 5.2.3-54 BIP-V システム構成

(2) 0DS(BIPS) 画像解析方法

a. 画像処理および割れ目データの取得

岩盤分離面の走向傾斜の測定は、画像データを読み出して室内解析システムのディスプレイ上に

表示し、孔壁との切合線として示される岩盤分離面にフィットするトレースライン(サインカーブ) を求めることにより行う(図 5.2.3-55)。

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 5.2.3-55 面構造の走向傾斜の解析ルーチン

b. 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。

c. 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
- ② 開口割れ目:割れ目のうち画像上で1mm以上の開口性が認められ、開口幅の測定が可能な もの。
- ③ 割れ目:画像上 50%以上連続している割れ目。
- ④ 破砕部:破砕した部分が 5cm 以上の幅を持つ場合。
- ⑤ 鉱物脈:鉱物が脈状に割れ目を充填しているもの。
- d. 開口幅または充填幅

幅 1mm 以上の分離面の開口幅、鉱物脈、破砕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、境界面の上・下盤の正距離とする。

e. 分離面形状

面要素の形状について、以下の3つに区分した。

- ① Plane: 岩盤分離面がきれいなサインカーブを描くもの。
- ② angulated: 岩盤分離面が曲がっている、ゆがんでいるもの。
- ③ step:岩盤分離面が階段状になっているもの。
- f. 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。

- ① 区分が開口割れ目、割れ目の場合:角礫状、細片状、派生割れ目付随など。
- ② 区分が破砕部の場合:上盤、下盤。
- ③ 区分が初生構造の場合:層理、片理、葉理、流理、岩相境界。
- ④ 区分が鉱物脈の場合:白色鉱物、緑色鉱物、黄色鉱物、石英、方解石など。
- (3) ODS データ解析方法
- a. 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。

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

c. 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、ハードディスクに記録 した。

d. 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。

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

幅の計測値の精度を確認するため、スケールプレートを孔口にセットし別途撮影、計測した。計 測結果を図 5.2.3-56 に示す。画像がやや見にくいが、これは孔内より気泡が出ていることにより、 スケールプレートに気泡が付着したためである。



180度(孔壁上側)

270 度 (孔壁右側)

図 5.2.3-56 幅の計測結果

b. 詳細観察シート(開口割れ目詳細観察結果)

DVS の観察対象区間のうち、単項式透水試験の結果透水性が認められ、且つ開口幅の計測が可能 な割れ目については、幅を計測した箇所を展開画像上に明示した、詳細観察シートを 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。

c. 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、全周画像を作成した。

5.2.3.11 孔底止水

ボーリング孔底からの湧水を、ボーリング孔底直上に設置した止水パッカーを約 3MPa まで加圧、 拡張することで止水した。その後、挿入に用いたロッド類を拡張した止水パッカーから切り離し、回 収した。

a. 使用資材

孔底止水に用いる止水パッカーは、ロッド接続側にパッカー拡張用の継手となるクイックコネク ツ・ステム(逆止弁付ワンタッチ継手)が接続されており、このステムにクイックコネクツ・ボデ ィを接続することで、パッカーとチューブとは導通、パッカー拡張用の流体を注入、排出できる構 造となる。パッカー拡張後には、ボディをステムから切り離すが、ステムの逆止弁によりパッカー 内の圧力が維持されるので、パッカーを拡張した状態のまま維持することができる。

図 5.2.3-57 に止水パッカーを、表 5.2.3-9 に止水作業に使用した資器材を示す。



図 5.2.3-57 止水パッカー

番号	部材	数量	単位	仕様
1	止水パッカー	1	本	スライド式、適用孔径 φ86mm
2	パッカー挿入ロッド	1	本	外径 48.6mm SUS
3	クイックコネクツ切離ロッド	1	本	外径 21.7mm SUS クイックコネクツ・ボディ取付
4	スクリーンロッド	1	本	外径 21.7mm SUS
5	φ21.7mm ロッド	30	m	外径 48.6mm SUS
6	φ 48.6mm ロッド	30	m	外径 48.6mm SUS
7	φ60.5mm ロッド	1	本	外径 60.5mm SUS 貸与品の間隙水圧モニタリング装置のロッドを使用
8	レジューサー	1	本	φ60.5mm ロッドーφ48.6mm ロッド中継
9	パッカー拡張チューブ	30	m	ナイロンチューブ (4mm×2mm)
10	手押しポンプ	1	台	

表 5.2.3-9 止水作業に用いた資機材一覧

止水パッカー設置の概念図を図 5.2.3-58 に示し、ボーリング孔底湧水の止水手順を以下に示す。



図 5.2.3-58 止水パッカー設置の概念図

(a) 止水パッカーの挿入

止水パッカーにロッドを接続しながらボーリング孔内の所定の深度に挿入する。

(b) パッカーの拡張(止水)

パッカー拡張チューブにクイックコネクツ切離ロッドを通し、パッカー拡張チューブと手押しポ ンプを接続する。湧水導水用配管から排出される孔内湧水量(止水パッカー拡張前)を測定した後、 手押しポンプにより止水パッカーを約 3MPa まで加圧し、パッカーを拡張させる。パッカー拡張後 は孔内湧水量(止水パッカー拡張後)を測定し、湧水量の減少を確認する。

(c) パッカー拡張チューブの切り離し

パッカー圧が安定したことを確認したのち、クイックコネクツ切離ロッドをパッカー挿入ロッド ロッド内へ挿入する。所定の深度まで挿入後、クイックコネクツ切離ロッドを孔内方向へ押しこむ ことで、パッカー拡張用チューブ先端に取り付けたクイックコネクツ・ボディをパッカー側のクイ ックコネクツ・システムから切り離し、パッカー拡張用チューブおよびクイックコネクツ切離ロッ ドを孔内から引き上げる。

(d) パッカー挿入ロッドの切り離し

ロッドを右回りに回転させ、パッカー挿入ロッドを止水パッカーから切り離し、孔内から引き上 げる。 5.3 調査結果

5.3.1 13MI37 号孔の調査結果

5.3.1.1 キャリパー検層結果

掘削終了後、孔径を把握するためにキャリパー検層を実施した。13MI37 号孔のキャリパー検層結果 を図 5.3.1-1 に示す。

5.00mabh まで孔口ケーシング~フロートシュー~セメンチング部である。

6.80mabh で孔径が 3mm 程度拡孔しているが、これは 6.70~6.97mabh の 0.27m 区間にわたって分布 する粘土鉱物、方解石、セリサイトが充填した細脈群に該当すると考えられる。7.6~8.1mabh 付近で 孔径が 2mm 程度拡孔しているが、これは 7.84~8.00mabh で観察された軟質な角礫状コア区間にあたる と考えられる。8.09mabh で確認された拡孔のピークは、8.05~8.09mabh で観察された亀裂である可能 性がある。また、8.10~8.60mabh は若干量拡孔しているが、8.05~8.32mabh で観察された弱度に変質 して軟質化した箇所にあたると考えられる。



※ 掘削長は 27.00mabh。ただし、25.70mabh 以深いはパッカーによる止 水を行ったため、測定対象外。

図 5.3.1-1 13MI37 号孔キャリパー検層結果

5.3.1.2 BTV・フローメータ検層結果

13MI37 号孔のフローメータ検層結果の一覧を表 5.3.1-1 に、検層結果を図 5.3.1-2 に示す。14MI49
号孔のフローメータ検層で流量変化が見られた深度は、17.8~17.9mabh、20.3~20.4mabh、20.7~
20.9mabh、21.0~21.1mabh、21.2~21.3mabh、22.5~23.1mabh、23.1~23.2mabhの7 深度であった。

流量変化が認められた7深度のうち、17.8~17.9mabh 間にはBTV から2本の割れ目が認められ、流 量変化量は1.2L/min であった。20.3~20.4mabh ではBTV から2本の割れ目が認められ、流量変化量 は7.1L/min であった。20.7~20.9mabh では、BTV から5本の割れ目が認められ、流量変化量は2.5L/min であった。21.0~21.1mabh 間にはBTV から3本の割れ目が認められ、流量変化量は3.0L/min であっ た。21.2~21.3mabh ではBTV から1本の割れ目が認められ、流量変化量は1.2L/min であった。22.5 ~23.1mabh では、BTV から14本の割れ目が認められ、流量変化量は1.4L/min であった。23.1~ 23.2mabh 間にはBTV から3本の割れ目が認められ、流量変化量は2.4L/min であった。

これらフローメータ検層や間隙水圧モニタリング等の観測結果を踏まえ、17~19mabh 付近、18~20 mabh 付近、19~21 mabh 付近、20~22 mabh 付近、21~22 mabh 付近、22~24 mabh 付近の計 6 か所に おいて透水試験を実施した。

孔 名	検層区間 (mabh)	流量変化点 (mabh)	流量変化量 (L/min)	コア観察結果から一致 する割れ目番号
		17.8~17.9	1.2	1-30
		20.3~20.4		2-3
				2-4
			7.1	2-5
				2″-3
				2″-4
		20.7 ~ 20.9		2-7
				2-8
			2.5	2″-5
				2″-6
				2″-7
		21 0~21 1	30	2-10
				2-11
				2-13
	3.51~24.38	21.2~21.3	1.2	2-14
13MI37				2″-11
		22.5~23.1		2″-14
				2″-15
				2″-16
				2-21
			1.4	2″-18
				2″-19
				2~-20
				2″-21
				2″-23
				2~-24
				2~-25
		23.1~23.2		2"-29
			2.4	2 30
				2 31
				2-22

表 5.3.1-1 13MI37 号孔のフローメータ検層結果一覧



※ 掘削長は 27.00mabh。ただし、25.70mabh 以深いはパッカーによる止 水を行ったため、測定対象外。

図 5.3.1-2 13MI37 号孔のフローメータ検層結果

5.3.1.3 透水試験結果(単孔式、孔間)

(1) 単孔式透水試験結果

単孔式透水試験の試験実施深度と湧水量も関係図を図 5.3.1-3~図 5.3.1-7 に示し、試験結果を 表 5.3.1-2 に示す。

試験対象とする割れ目は、コア観察やBTVの画像、フローメータ検層結果および掘削時の湧水量 変化より、12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔との連結性が期待される 17~19mabh 付近、18 ~20mabh 付近、19~21mabh 付近、20~22mabh 付近、22~24mabh 付近の割れ目を抽出した。

単孔式の透水試験は、抽出した割れ目の深度と湧水量を詳細に把握し、概略な透水量係数を得る 目的で実施し、その結果から孔間透水試験区間を選定した。



図 5.3.1-3 13MI37 号孔 22~24mabh 付近の単孔 式透水試験深度図



図 5.3.1-5 13MI37 号孔 19~21mabh 付近の単孔 式透水試験深度図



図 5.3.1-4 13MI37 号孔 20~22mabh 付近の単孔 式透水試験深度図



図5.3.1-6 13MI37号孔18~20mabh付近の単孔

式透水試験深度図



図 5.3.1-7 13MI37 号孔 17~19mabh 付近の単孔式透水試験深度図

試験番号	孔間透水試験 試験番号	試験深度		区間長		透水量係数	湧水量	水圧
		上端 mabh	下端 mabh)	m	割れ目番号	m²/sec	L/min	mH₂O
透水1	—	23.30	23.97		2-23~2-27	1.94E-09	0.04	
透水2	_	23.15	23.72		2-23~2-26	1.94E-07	4.00	1.5027
透水3 ※	No.1	22.80	23.47	0.67	2-22~2-23	1.94E-07	4.00	
透水4	—	21.60	22.27		2-18~2-20	0.00E+00	0.00	1.4887
透水5	—	21.40	22.07		2-16~2-18, 2'-1	6.38E-08	1.30	
透水6 ※	No.2	21.20	21.87		2-14~2-18, 2'-1	2.70E-07	5.50	
透水7	_	20.90	21.57		2-9~2-17, 2'-1	3.68E-07	7.50	
透水8 ※	No.3	20.50	21.17		2-6~2-12	5.43E-07	11.10	1.4907
透水9	_	20.20	20.87		2-2~2-8	6.76E-07	13.80	
透水10 ※	No.4	19.90	20.57		1-39, 2-1 ~ 2-5	7.33E-07	15.00	
透水11	—	19.50	20.17		1-38~1-39, 2-1	2.44E-08	0.50	1.4927
透水12	—	19.40	20.07		1-38~1-39, 2-1	2.44E-08	0.50	
透水13 ※	No.5	18.70	19.37		1-34~1-35	9.76E-08	2.00	1 4027
透水14	_	18.10	18.77		1-32~1-33, 1'-2	4.90E-09	0.10	1.4937
透水15 ※	No.6	17.70	18.37		1-30~1-33, 1'-2	5.19E-08	1.05	
透水16	_	17.30	17.97		1-25~1-30	4.96E-08	1.00	1.4757
透水17	_	17.10	17.77		1-25~1-29	9.88E-09	0.20	

表 5.3.1-2 13MI37 号孔単孔式透水試験の結果

※孔間透水試験の実施区間

(2) 孔間透水試験結果

単孔式透水試験結果から選定した6深度(透水試験3,6,8,10,13,15)において孔間水理試験を実施した。孔間透水試験は、試験番号No.1~6の全試験で定流量揚水試験を実施した。また、試験中

は間隙水圧モニタリング装置のサンプリングインターバルを5秒に変更して孔間透水試験時の水圧 応答を計測した。

a. No.1 区間(22.80~23.47mabh)の透水試験結果

No.1 区間の湧水量は 4.00L/min であり、揚水量 0.80L/min の定流量揚水試験を実施した。

試験区間 P2 の圧力変化を図 5.3.1-8 に示す。揚水試験時の P2 水頭差は 16.24mH20 であった。

揚水過程の Derivative Plot を図 5.3.1-9 に、Jacob 法による解析結果を図 5.3.1-10 に、回復過 程の Derivative Plot を図 5.3.1-11 に、Agarwal 法による解析結果を図 5.3.1-12 に示す。揚水過 程において、図 5.3.1-10 に示す直線勾配から Jacob の式を用いて透水量係数 T を求めると T=1.58E-05(m²/sec)が得られた。また、回復過程においても図 5.3.1-12 に示す直線勾配から Agarwal の式を用いて透水量係数 T を求めると T=1.39E-05(m²/sec)が得られた。

No.1の試験区間における透水量係数の代表値は、揚水過程と回復過程ともに近い値であることから、揚水過程における遠方の透水性を表す Jacob の式による T=1.58E-05(m²/sec)とした。

12MI30 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.1-13 に、12MI 31 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.1-14 に、 13MI36 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.1-15 に示す。

No.1 透水試験時で最も水圧が応答した区間は 12MI31 号孔の Int1 であった。



経時変化

図 5.3.1-8 13MI37 号孔 No.1 区間の試験時における圧力変化







図 5.3.1-10 13MI37 号孔 No.1 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果







図 5.3.1-12 13MI37 号孔 No.1 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果



図 5.3.1-13 13MI37 号孔 No.1 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.1-14 13MI37 号孔 No.1 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.1-15 13MI37 号孔 No.1 区間定流量揚水試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図

b. No.2 区間(21.20~21.87mabh)の透水試験結果

No. 2 区間の湧水量は 5.50L/min であり、揚水量 0.73L/min の定流量揚水試験を実施した。 試験区間 P2 の圧力変化を図 5.3.1-16 に示す。揚水試験時の P2 水頭差は 8.08mH₂0 であった。

揚水過程の Derivative Plot を図 5.3.1-17 に、Jacob 法による解析結果を図 5.3.1-18 に、回復 過程の Derivative Plot を図 5.3.1-19 に、Agarwal 法による解析結果を図 5.3.1-20 に示す。揚水 過程において、図 5.3.1-18 に示す直線勾配が見出され、Jacob の式を用いて透水量係数 *T*を求める と *T*=2.47E-05 (m²/sec)が得られた。また、回復過程において図 5.3.1-20 に示す直線勾配が見出さ れ、Agarwal の式を用いて透水量係数 *T*を求めると *T*=3.08E-05 (m²/sec)が得られた。揚水期間中の 間隙水圧応答に脈動がみられたため、No.2 の試験区間における透水量係数の代表値は、Agarwal の 式による *T*=3.08E-05 (m²/sec) とした。

12MI30 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.1-21 に、12MI 31 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.1-22 に、 13MI36 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.1-23 に示す。

No.2 透水試験時で最も水圧が応答した区間は 12MI30 号孔の Int4 であった。



図 5.3.1-16 13MI37 号孔 No.2 区間の試験時の圧力変化



図 5.3.1-17 13MI37 号孔 No.2 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot



図 5.3.1-18 13MI37 号孔 No.2 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果



図 5.3.1-19 13MI37 号孔 No.2 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot



図 5.3.1-20 13MI37 号孔 No.2 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果



図 5.3.1-21 13MI37 号孔 No.2 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.1-22 13MI37 号孔 No.2 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.1-23 13MI37 号孔 No.2 区間定流量揚水試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図

c. No.3 区間(20.50~21.17mabh)の透水試験結果

No. 3 区間の湧水量は 11.10L/min であり、揚水量 2.00L/min の定流量揚水試験を実施した。
試験区間 P2 の圧力変化を図 5.3.1-24 に示す。揚水試験時の P2 水頭差は 14.31mH₂0 であった。
揚水過程の Derivative Plot を図 5.3.1-25 に、Jacob 法による解析結果を図 5.3.1-26 に、回復
過程の Derivative Plot を図 5.3.1-27 に、Agarwal 法による解析結果図を図 5.3.1-28 に示す。

揚水過程において、図 5.3.1-26 に示す直線勾配が見出され、Jacob の式を用いて透水量係数 *T*を 求めると *T*=8.36E-06(m²/sec)が得られた。また、回復過程においても図 5.3.1-28 に示す直線勾配 が見出され、Agarwal の式を用いて透水量係数 *T*を求めると *T*=1.77E-05(m²/sec)が得られた。

揚水期間中の間隙水圧応答に脈動がみられたため、No.3の試験区間における透水量係数の代表値は、Agarwalの式による *T*=1.77E-05(m²/sec)とした。

12MI30 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.1-29 に、12MI 31 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.1-30 に、 13MI36 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.1-31 に示す。



No.3 透水試験時で最も水圧が応答した区間は 12MI31 号孔の Int3, Int4 であった。

図 5.3.1-24 13MI37 号孔 No.3 区間の試験時における圧力変化







図 5.3.1-26 13MI37 号孔 No.3 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果







図 5.3.1-28 13MI37 号孔 No.3 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果



図 5.3.1-29 13MI37 号孔 No.3 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.1-30 13MI37 号孔 No.3 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.1-31 13MI37 号孔 No.3 区間定流量揚水試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図

d. No.4 区間(19.90~20.57mabh)の透水試験結果

No. 4 区間の湧水量は 15. 00L/min であり、揚水量 2. 10L/min の定流量揚水試験を実施した。 試験区間 P2 の圧力変化を図 5. 3. 1-32 に示す。揚水試験時の P2 水頭差は 11. 54mH₂0 であった。 揚水過程の Derivative Plot を図 5. 3. 1-33 に、Jacob 法による解析結果を図 5. 3. 1-34 に、回復 過程の Derivative Plot を図 5. 3. 1-35 に、Agarwal 法による解析結果図を図 5. 3. 1- 36 に示す。

揚水過程において、図 5.3.1-34 に示す直線勾配が見出され、Jacob の式を用いて透水量係数 *Tを* 求めると *T*=1.26E-05(m²/sec)が得られた。また、回復過程においても図 5.3.1-36 に示す直線勾配 が見出され、Agarwal の式を用いて透水量係数 *T*を求めると *T*=2.30E-05(m²/sec)が得られた。

揚水期間中の間隙水圧応答に脈動がみられたため、No.3の試験区間における透水量係数の代表値は、Agarwalの式による 7=2.30E-05(m²/sec)とした。

12MI30 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.1-37 に、12MI 31 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.1-38 に、 13MI36 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.1-39 に示す。

No.4 透水試験時で最も水圧が応答した区間は 12MI30 号孔の Int4 であった。







図 5.3.1-33 13MI37 号孔 No.4 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot



図 5.3.1-34 13MI37 号孔 No.4 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果



図 5.3.1-35 13MI37 号孔 No.4 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot



図 5.3.1-36 14MI49 号孔 No.4 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果



図 5.3.1-37 13MI37 号孔 No.4 区間定流量試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.1-38 13MI37 号孔 No.4 区間定流量試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.1-39 13MI37 号孔 No.4 区間定流量試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図

e. No.5 区間(18.70~19.37mabh)の透水試験結果

No. 5 区間の湧水量は 2.00L/min であり、揚水量 0.48L/min の定流量揚水試験を実施した。
試験区間 P2 の圧力変化を図 5.3.1-40 に示す。揚水試験時の P2 水頭差は 19.31mH₂0 であった。
揚水過程の Derivative Plot を図 5.3.1-41 に、Jacob 法による解析結果を図 5.3.1-42 に、回復
過程の Derivative Plot を図 5.3.1-43 に、Agarwal 法による解析結果図を図 5.3.1-44 に示す。

揚水過程において、図 5.3.1-42 に示す直線勾配が見出され、Jacob の式を用いて透水量係数 *T*を 求めると *T*=1.02E-05(m²/sec)が得られた。また、回復過程においても図 5.3.1-44 に示す直線勾配 が見出され、Agarwal の式を用いて透水量係数 *T*を求めると *T*=8.55E-06(m²/sec)が得られた。

No.1の試験区間における透水量係数の代表値は、揚水過程と回復過程ともに近い値であることから、揚水過程における遠方の透水性を表す Jacob の式による *T*=1.02E-05(m²/sec)とした。

12MI30 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.1-45 に、12MI 31 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.1-46 に、 13MI36 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.1-47 に示す。



No.5 透水試験時で最も水圧が応答した区間は 12MI30 号孔の Int4 であった。

図 5.3.1-40 13MI37 号孔 No.5 区間試験時における圧力変化


















図 5.3.1-45 13MI37 号孔 No.5 区間定流量試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.1-46 13MI37 号孔 No.5 区間定流量試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.1-47 13MI37 号孔 No.5 区間定流量試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図

f. No.6 区間(17.70~18.37mabh)の透水試験結果

No. 6 区間の湧水量は 1. 05L/min であり、揚水量 0. 24L/min の定流量揚水試験を実施した。 試験区間 P2 の圧力変化を図 5. 3. 1-48 に示す。揚水試験時の P2 水頭差は 21. 66mH₂0 であった。 揚水過程の Derivative Plot を図 5. 3. 1-49 に、Jacob 法による解析結果を図 5. 3. 1-50 に、回復 過程の Derivative Plot を図 5. 3. 1-51 に、Agarwal 法による解析結果図を図 5. 3. 1-52 に示す。

揚水過程において、図 5.3.1-50 に示す直線勾配が見出され、Jacob の式を用いて透水量係数 *Tを* 求めると *T*=1.06E-06(m²/sec)が得られた。また、回復過程においても図 5.3.1-52 に示す直線勾配 が見出され、Agarwal の式を用いて透水量係数 *T*を求めると *T*=3.30E-06(m²/sec)が得られた。

No.1の試験区間における透水量係数の代表値は、揚水過程と回復過程ともに近い値であることから、揚水過程における遠方の透水性を表す Jacob の式による *T*=1.06E-06 (m²/sec) とした。

12MI30 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.1-53 に、12MI 31 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.1-54 に、 13MI36 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.1-55 に示す。

No.6 透水試験時で最も水圧が応答した区間は 12MI31 号孔の Int3, Int4, Int6 であった。



図 5.3.1-49 13MI37 号孔 No.6 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot







図 5.3.1-51 13MI37 号孔 No.6 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot







図 5.3.1-53 13MI37 号孔 No.6 区間定流量試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.1-54 13MI37 号孔 No.6 区間定流量試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.1-55 13MI37 号孔 No.6 区間定流量試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図

g. 13MI37 号孔における孔間透水試験結果のまとめ

13MI37 号孔で実施した孔間透水試験結果一覧を表 5.3.1-3 および図 5.3.1-56 に、孔間透水試験 中に確認した 12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔の圧力応答結果を表 5.3.1-4 に示す。

孔間透水試験の結果、15mabh 以深では 10⁻⁵~10⁻⁶ m²/sec の透水量係数を示す箇所が最も多いこと が確認できた。また、圧力応答結果から複数の水理的な連続性が確認されたが、水理的に独立した 単一割れ目は確認できなかった。

試驗悉是	試験	深度	試驗方法	解析法	透水量係数	貯留係数	初期間隙水圧	揚水量	区間湧水量	
山利田ウ	上端(mabh)	下端(mabh)	山内ノリム	/////A	(m²/sec)	くきょう	Мра	(L/min)	(L/min)	
No 1	22.80	23.47		Jacob	1.58E-05	-	1 5027	0.80	4.00	
NO.1	22.00	23.47		Agarwal	1.39E-05	-	1.5027	0.00	4.00	
No 2	21.20	01.07		Jacob	2.47E-05	-	1 4007	0.72	5 50	
NO.2	21.20	1.20 21.87		Agarwal	3.08E-05	-	1.4007	0.73	5.50	
No 2	20.50 21.17	01.17		Jacob	8.36E-06	-	1 / 0 0 7	2.00	11.10	
N0.3	20.50	21.17	定流量	Agarwal	1.77E-05	-	1.4907			
No.4	10.00	20.57	揚水試験	Jacob	1.26E-05	-	1 40 27	2.10	15.00	
N0.4	19.90	20.37		Agarwal	2.30E-05	-	1.4927	2.10		
No 5	19.70	10.27		Jacob	1.02E-05	-	1 4027	0.40	0.00	
N0.5	No.5 18.70			Agarwal	8.55E-06	-	1.4937	0.40	2.00	
No.6	N 0 47.70	10.27		Jacob	1.06E-06	-	1 4757	0.24	1.05	
No.6 17.70	10.37		Agarwal	3.30E-06	-	1.4/5/	0.24	1.05		

表 5.3.1-3 13MI37 号孔 孔間透水試験結果一覧表

※ 透水量係数の太文字の値を代表値とした。



図 5.3.1-56 孔間透水試験結果一覧図

	表 5.3.1-4	12MI30 号孔。	12MI31 号孔、	13MI36 号孔への圧力応答結果一覧	表
--	-----------	------------	------------	---------------------	---

	12Mi30 (mH ₂ O)									
試験番号	Intl	Int2	Int3	Int4	Int5	Int6	Int7			
	25.53~24.92(mabh)	24.22~24.52mabh	21.99~23.82mabh	20.79~20.19mabh	18.99~11.39mabh	10.19~9.59mabh	8.39~0.00mabh			
No.1		0.039	0.046	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし			
22.80~23.4/maph	$\langle \rangle$									
No.2 21.20~21.87mabh		変化なし	変化なし	0.035	0.011	0.011	変化なし			
No.3 20.50~21.17mabh	\geq	変化なし	0.016	0.107	0.033	0.033	変化なし			
No.4 19.90~20.57mabh	>>	0.019	0.026	0.097	0.028	0.030	変化なし			
No.5 18.70~19.37mabh		変化なし	変化なし	0.014	変化なし	変化なし	変化なし			
No.6 17.70~18.37mabh		変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし			

	12MI31 (mH ₂ O)									
試験番号	Inti	Int2	Int3	Int4	Int5	Int6	Int7	Int8		
	26.00~23.30(mabh)	22.93~22.63mabh	22.20~20.37mabh	19.17~18.07mabh	16.87~16.27mabh	15.07~14.07mabh	12.87~7.77mabh	6.57~0.00mabh		
No.1 22.80~23.47mabh	0.061	0.035	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし		
No.2 21.20~21.87mabh	変化なし	変化なし	0.022	0.017	0.015	変化なし	変化なし	変化なし		
No.3 20.50~21.17mabh	変化なし	0.027	0.062	0.051	0.041	変化なし	変化なし	変化なし		
No.4 19.90~20.57mabh	0.025	0.030	0.056	0.045	0.036	変化なし	変化なし	変化なし		
No.5 18.70~19.37mabh	変化なし	変化なし	0.010	変化なし	変化なし	0.010	変化なし	変化なし		
No.6 17.70~18.37mabh	変化なし	変化なし	0.018	0.014	変化なし	0.017	変化なし	変化なし		

	13MI36 (mH ₂ O)									
試験番号	Int1	Int2	Int3	Int4	Int5	lnt6	Int7			
	20.17~19.82(mabh)	18.62~18.02mabh	16.82~15.60mabh	15.15~14.85mabh	14.40~13.82mabh	12.62~8.02mabh	6.82~0.00mabh			
No.1 22.80~23.47mabh	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし			
No.2 21.20~21.87mabh	変化なし	0.013	変化なし	0.012	変化なし	変化なし	変化なし			
No.3 20.50~21.17mabh	0.029	0.040	0.021	0.037	0.012	変化なし	変化なし			
No.4 19.90~20.57mabh	0.024	0.034	0.016	0.032	変化なし	変化なし	変化なし			
No.5 18.70~19.37mabh	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし			
No.6 17.70~18.37mabh	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし			

5.3.2 14MI49 号孔の調査結果

5.3.2.1 ボーリング掘削位置の設定

今回掘削した 14MI49 号孔の位置および方向は、岩盤割れ目の走向傾斜と深度 300m ボーリング横坑 における地質状況・割れ目の分布状況・周辺の観測設備設置状況等や 12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔、14MI49 号孔の掘削位置を考慮し設定した。

14MI49 号孔の仕様一覧を表 5.3.2-1 に、14MI49 号孔の掘削方向図を図 5.3.2-1 に示す。掘削位置 および方向は、瑞浪換気立坑の中心部から南西方向に 13.25m 離れた位置で、平面方向は S81°W、鉛 直方向は水平から下向き 31°とした。

孔名	14MI49 号孔			
掘削方法	オールコア、清水掘削			
主要孔径	86mm			
掘削長	22.47mabh			
掘削方向 鉛直方向:-30°(下向き) 水平方向:方位 S80° ₩				
掘削位置	X=-69048.140 Y=6419.064 (世界測地系) 標高 EL-99.10m			

表 5.3.2-1 14MI49 号孔の仕様



図 5.3.2-1 14MI49 号孔の掘削方向平面図

5.3.2.2 ボーリング孔掘削

(1) 1段目掘削

1 段目の掘削は、孔口から 5.0mabh の計画としていたが、採取したコアの亀裂状況から、孔口ケ ーシングのセメントによる固定に配慮し、4.3mabh までとした。

掘削は掘削外径 \$ 86mm、コア径 \$ 72mm でコア採取を行った。

コア採取後は ϕ 101.0mm→ ϕ 127.0mm→ ϕ 140.0mm ダイヤモンドビットを用いて3段階で拡孔し、4 インチ SUS 製のフランジ付孔ロケーシングを挿入した。

孔ロケーシング挿入後は、岩盤とケーシングを固定するためにケーシング外側の孔内部にセメントを充填した。セメント硬化養生後、加圧試験(水圧 3MPa を 10 分間維持)を行い、遮水性能を確認した。

孔口ケーシングの設置概念図を図 5.3.2-2 に示す。



図 5.3.2-2 14MI49 号孔ロケーシング設置概念図

(2) 2段目掘削

 2 段目の掘削は、14MI49 号孔掘削時に大量湧水(200 L/min)をもたらした水みち亀裂への接触を 避けるため 24mabh 程度までの計画であったが、本孔では 22.07mabh~22.47mabh 掘削中に、掘削完 了の判断基準の一つとした 20L/min を超える湧水が確認されたため(孔口湧水量 20.1L/min)、
 22.47mabh にて掘削を終了した。

(3) コア採取率

孔口~22.47mabh までの掘削に対して、全深度でコア採取率100%であった。

(4) 掘削時の湧水量

掘削時に1掘進長ごとに孔口からの湧水量を測定した。測定結果を表 5.3.2-2 および、図 5.3.2-3 に示す。

孔口から湧水が確認されたのは 10.45mabh~11.10mabh を掘削した後であり、最終湧水量は
20.00L/min であった。また、掘削区間ごとに 0.5L/min 以上の湧水量が認められたのは、以下の 4
区間であった。図 5.3.2-4 に当該区間のコア写真を示す。

- 10.45mabh~11.10mabh (0.66L/min)
- 13.95mabh~14.95mabh (4.24L/min)
- 14.95mabh~15.75mabh (1.80L/min)
- 21.85mabh~22.47mabh (12.80L/min)

掘	削区	間	測定湧水量	区間湧水量
	mabh		L/min	L/min
0.00	~	0.50	0.00	0.00
0.50	~	1.05	0.00	0.00
1.05	~	2.10	0.00	0.00
2.10	~	3.10	0.00	0.00
3.10	~	4.10	0.00	0.00
4.10	~	5.10	0.00	0.00
5.10	~	5.50	0.00	0.00
5.50	~	6.45	0.00	0.00
6.45	~	7.45	0.00	0.00
7.45	~	8.45	0.00	0.00
8.45	~	9.45	0.00	0.00
9.45	~	10.45	0.00	0.00
10.45	~	11.10	0.66	0.66
11.10	~	11.95	0.66	0.00
11.95	~	12.95	0.66	0.00
12.95	~	13.95	0.66	0.00
13.95	~	14.95	4.90	4.24
14.95	~	15.75	6.70	1.80
15.75	~	16.75	7.20	0.50
16.75	~	17.50	6.90	-0.30
17.50	~	18.30	6.90	0.00
18.30	~	19.25	6.90	0.00
19.25	~	19.85	6.90	0.00
19.85	~	20.45	6.90	0.00
20.45	~	21.10	7.20	0.30
21.10	~	21.85	7.20	0.00
21.85	~	22.47	20.00	12.80

表 5.3.2-2 14MI49 号孔掘削時孔口湧水量測定結果



図 5.3.2-3 14MI49 号孔掘削時孔口湧水量測定結果



図 5.3.2-4 14MI49 号孔湧水区間のコア写真

(5) 12MI30 号孔、12MI31 号孔への水圧挙動

14MI49 号孔掘削時における 12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔、14MI49 号孔への水圧挙動を 図 5.3.2-6~図 5.3.2-9 に示す。水圧の応答としては 10~10.5mabh 付近、15.0mabh 付近、15.5mabh 付近、16.5mabh 付近、22.5mabh 付近の 5 深度でとくに大きな水圧変化が見られた。特定の孔の単 一区間への応答は確認されなかった。

なお、14MI49号孔掘削時のモニタリング装置の配置を図 5.3.2-5 に示す。



図 5.3.2-5 14MI49 号孔掘削時のモニタリング装置の配置



図 5.3.2-6 14MI49 号孔掘削中の 12MI30 号孔の水圧挙動



図 5.3.2-7 14MI49 号孔掘削中の 12MI31 号孔への水圧挙動



図 5.3.2-8 14MI49 号孔掘削中の 13MI36 号孔の水圧挙動



図 5.3.2-9 14MI49 号孔掘削中の 13MI37 号孔への水圧挙動

(6) 掘削水の蛍光染料の濃度管理

ボーリング掘削水にはアミノG酸をトレーサーとして添加して掘削を行った。掘削中は1時間以下の間隔でリターン水をサンプリングし、濃度が5mg/L±10%以内の範囲にあることを確認した。 図 5.3.2-10 にアミノG酸濃度と湧水量の深度変化を示す。

14MI49 号孔においてトレーサー濃度管理を行った深度は、孔口から 14.95mabh までである。

孔口~10.45mabh間では湧水は認められず、濃度調整の結果、概ね5mg/L±10%の範囲に収めることが出来た。14.95mabh付近で湧水量が4.9L/minと多くなり、濃度調整が困難となったため、アミノG酸の添加及び濃度計測を終了した。なお、添加したアミノG酸の総量は4.70gであった。



図 5.3.2-10 14MI49 号孔掘削水のアミノG酸濃度と湧水量

5.3.2.3 コア観察結果

14MI49 号孔で掘削した 0~22.47mabh 間について、コアの採取および記載を行った。14MI49 号孔の総合地質柱状図を図 5.3.2-11 に、コア写真を図 5.3.2-12~図 5.3.2-14 に示す。

(1) 岩相

14MI49 号孔の孔口から 0.193mabh 間はコンクリートである。それ以深~22.47mabh 間の地質は、 中粒黒雲母花崗岩(土岐花崗岩)より構成され、弱い変質といくつかの時期の異なる変形作用を被 っている。

花崗岩は石英、長石類および黒雲母を主体として構成され、まれに角閃石が認められる。岩石の

組織は中粒の等粒状組織もしくは、長石の斑晶を伴う斑状組織を示し、斑晶は最大径 30mm 程度の ものが認められる。

(2) 変質

図 5.3.2-11 の 14MI49 号孔総合柱状図に母岩の変質の程度、割れ目沿いの変質および割れ目充填 鉱物の分布を示す。なお、以下に述べる変質の強さの表現(強、中、弱)は、コア観察記載要領に 基づく。

本孔の全体的な変質の特徴としては、母岩全体に長石が白濁化する弱い変質を受け、断層や一部 の割れ目の集中する区間には、長石のセリサイト化、粘土化、緑泥石および黄鉄鉱の形成が認めら れた。深度 0~22.47mabh 間にわたり長石の弱度の白濁化が認められたため、全体的には弱変質と 判断した。ただし、深度 7.55~8.11mabh 付近は断層角礫岩を呈し、長石の白濁化が見られたため 中変質、深度 18.57~19.94mabh 間はカタクラサイト及び、長石の白濁化が見られたため中変質と 判断した。

a. 割れ目沿いの変質

割れ目沿いの変質は割れ目が発達する区間で認められ、割れ目の少ない区間では認められない。 以下に、主な割れ目沿いの変質について特徴を述べる。

(a) 0.65~0.67mabh 間

割れ目沿いの幅 25mm の範囲で強変質程度の炭酸塩化(塩酸で反応あり)が認められる。

(b) 7.55~8.11mabh 間

角礫状コアを呈する破砕帯で、岩芯もやや軟質。多数本発達した割れ目沿いに強変質程度のセリ サイト化・粘土化が認められる。

(c) 13.91~13.95mabh 間

角礫状コアを呈し脆弱。岩芯は硬質だが、角礫周縁は中変質程度に粘土化。

(d) 18.57~18.64mabh 間

カタクラサイトを呈し、細礫状岩片の周縁が強変質程度の緑泥石化。

(e) 19.78~19.83mabh 間

カタクラサイトを呈し、細礫状岩片の周縁が強変質程度の緑泥石化。

(f) 23.31~23.32mabh 間

カタクラサイトを呈し、細礫状岩片の周縁が強変質程度の緑泥石化。



図 5.3.2-11 14MI49 号孔総合柱状図

0.00 ~	1.00 ~	2.00	3.00 ~	4.00 ~	5.00	6	.00 ~	7.00 ~	8.00 ~
1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7	.00	8.00	9.00
							and the second of the second o		

図 5.3.2-12 コア写真 14MI49 号孔(0~9mabh)

9.00 ~	10.00 ~	11.00 ~	12.00 ~	13.00 ~	14.00 ~	15.00 ~	16.00 ~	17.00 ~
10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00

図 5.3.2-13 コア写真 14MI49 号孔 (9~18mabh)

18.00 19.00 ~ ~	20.00	21.00	22.00
19.00 20.00	21.00	22.00	23.00

図 5.3.2-14 コア写真 14MI49 号孔 (18~22.47mabh)

b. 割れ目充填鉱物

割れ目充填鉱物は、緑泥石、方解石を主体とし、粘土、黄鉄鉱が認められた。

以下に充填鉱物の主体を成す緑泥石および方解石について、分布区間や特徴について述べる。

(a) 緑泥石

主な分布区間は、7.58mabh、14.69~14.92mabh 間、15.66mabh、18.63mabh(細脈群)、19.93mabh (細脈群)に認められる。図 5.3.2-15 に代表的な緑泥石の写真を示す。右写真の暗緑色の付着物 が緑泥石である。また、本孔において 3 箇所に認められたカタクラサイト(18.57~18.64mabh間、 19.78~19.83mabh間、22.31~22.32mabh間)の基質部はいずれも緑泥石化している。



図 5.3.2-15 14MI49 号孔 緑泥石脈と緑泥石の付着する割れ目 (左写真;14.85mabh 付近、右写真;14.85mabh)

(b) 炭酸塩鉱物(方解石、霰石)

主な分布区間は、0.65mabh、2.12mabh、2.12~2.20mabh間、4.06mabhに認められる。炭酸塩鉱物 は塩酸との反応により確認した。0.65mabhの割れ目のみ霰石が充填し、その他では方解石が充填す る。4.06mabhの割れ目には幅10mmにわたり方解石が充填する。方解石は、灰色の未固結な粉末状 および、粘土状の付着物、または希に灰色で固結した充填物として産する。なお、粘土状の付着物 は方解石以外の粘土鉱物の混在も考えられる。図 5.3.2-16の写真は、細粒未固結な方解石が淡灰 色軟質な粘土状の付着物として、割れ目を充填する様子を示す。



※ 霰石: 方解石と同組成 CaCO₃の炭酸塩鉱物の一種で、塩酸と反応する。暗褐色で針状結晶を示す。
 図 5.3.2-16 14MI49 号孔 緑泥石脈と緑泥石の付着する割れ目
 (左写真; 14.85mabh 付近、右写真; 14.85mabh)

(c) 黄鉄鉱

黄鉄鉱は割れ目充填鉱物の一部として産するほか、岩盤中での塊状の濃集も認められる(5.12mabh、 14.05mabh)。割れ目を充填する形態は、2.60mabh、22.37mabhに認められるが、ごく少量に薄く産 する程度である。図 5.3.2-17の写真は、黄鉄鉱が割れ目に分布する様子を示す。



図 5.3.2-17 14MI49 号孔 割れ目に少量認められる黄鉄鉱 (22.37mabh)

(3) 割れ目

割れ目の発達状況に基づき、14MI49 号孔を6区間に区分して記述する。6区間の深度は、割れ目 が発達する 0.0~1.0mabh 間、割れ目が少ない 1.0~7.0mabh 間、割れ目が発達する 7.0~8.0mabh 間、割れ目が少ない 8.0~18.0mabh 間、割れ目が少ないが細脈が発達する 18.0~22.0mabh 間、割 れ目が発達する 22.0~22.5mabh である。

以下に記述する割れ目密度は、コア観察時に分離した状態(非密着)の構造性割れ目の本数であり、 「TorD(引張または、機械割れ目)」と判定した割れ目も含まれる。 a. 0~1.0mabh 間

本区間は、割れ目が発達する区間であり、割れ目密度 21 本/m、平均 21 本/m である(コンクリート区間を除く)。割れ目の傾斜角は中角なものに富む。他区間と比べ坑道壁面に近いため、掘削に伴う応力解放により割れ目密度がやや高くなったと考えられる。

b. 1.0~7.0mabh 間

本区間は、割れ目密度は 5~13本/m、平均 7.6本/m と割れ目の発達が少なく、健岩部が連続する。 割れ目の傾斜角は中角のものが多く、成因は剪断または引張割れ目が主体である。

c. 7.0~8.0mabh間

本区間は割れ目が発達する区間であり、割れ目密度は10本/m、平均10本/mである。割れ目の傾 斜角は低角なものに富み、割れ目の成因は剪断及び、剪断または引張割れ目が主体である。7.55~ 8.11mabh 間の0.56m長にわたり、破砕帯と考えられる断層角礫岩が確認される。図5.3.2-18 にそ の一部の写真を示す。この区間は剪断割れ目を主体とし、傾斜は15~40°を示す。岩芯まで脆弱で あり指圧でコアを変形でき、礫間にセリサイトと粘土の挟在が認められる。



図 5.3.2-18 14MI49 号孔 断層角礫岩(深度 7.55~8.11mabh) (左写真; 7.58~8.00mabh 付近、右写真; 8.00~8.11mabh 付近)

d. 8.0~18.0mabh 間

本区間は、割れ目密度は1~6本/m、平均4.2本/mと割れ目の発達が少なく、健岩部が連続する。 割れ目の傾斜角は低角~中角のものが多く、成因については剪断または引張割れ目が主体である。 13.91~13.99mabh間で断層角礫岩が確認された。図5.3.2-19にその写真を示す。傾斜は20~25°、 礫径は10~40mmを示し、岩芯は硬質だが角礫周縁部は粘土化している。



図 5.3.2-19 14MI49 号孔 断層角礫岩(13.91~13.99mabh 間)

e. 18.0~22.0mabh間

本区間は、割れ目は発達しない区間であるが細脈群が発達し、割れ目密度は3~6本/m、平均4.2 本/mである。割れ目の傾斜角は低角~中角のものが多く、成因については引張割れ目がやや優勢で ある。

18.57~18.64mabh 間、19.78~19.83mabh 間でカタクラサイトが確認された。傾斜は前者では 35~40°、後者では 30~45°を示す。ともに基質部分は緑泥石化しており、コア自体は硬質である。

f. 22.0~22.5mabh間

本区間は割れ目が発達する区間であり、割れ目密度は15本/m、平均15本/mである。割れ目の傾 斜角は低角~中角のものが多く、成因については剪断がやや優勢である。

22.31~22.47mabh 間で断層角礫岩、そのうち 22.31~22.32mabh 間でカタクラサイトが確認された。断層角礫岩の傾斜は前者では 25~35°を示す。カタクラサイトの基質部分は緑泥石化しており、 コア自体は硬質である。この断層角礫岩の掘削深度で湧水量 20.0L/min が観測されたため、堀止め とした。

(4) 岩盤等級および RQD

14MI49 号孔の岩盤等級は、記載マニュアルに基づき変質の程度から 11.0~13.0mabh 間は A 級、 1.0~3.0mabh 間、10.0~11.0mabh 間、15.0~18.0mabh 間、19.0~22.0mabh 間は B 級、0.0~1.0mabh、 3.0~7.0mabh 間、9.0~10.0mabh、14.0~15.0mabh 間、18.0~19.0mabh は CH 級、8.0~9.0mabh 間 は CM 級、7.0~8.0mabh 間、22.0~23.0mabh 間は CL 級と判定した。

RQD については、浅部で割れ目の発達する 0~1.0mabh では 40 (コンクリート部分を除き 100cm コア長に換算)を示し低い。割れ目の少ない区間である 1.0~4.0mabh 間の RQD は 72~74 の範囲を 示し平均は 73 である。割れ目が発達する 4.0~5.0mabh 間の RQD は 56 である。割れ目の少ない区 間である 5.0~7.0mabh 間の RQD は 89~90 の範囲を示し平均は 90 である。割れ目が発達する 7.0 ~8. 0mabh 間の RQD は 46 である。割れ目の少ない区間である 8. 0~10. 0mabh 間の RQD は 80~83 の 範囲を示し平均は 82 である。10. 0~11. 0mabh 間の RQD は 47 であるが、これは 10. 60mabh 付近で高 角の亀裂が存在するため RQD が低く評価されたものであり、割れ目密度は 3n/m で健岩部である。 割れ目の少ない区間である 11. 0~22. 0mabh 間の RQD は 82~98 の範囲を示し平均は 91 である。割 れ目が発達する 22. 0~22. 5mabh 間の RQD は 72 (孔底までを 100cm コア長に換算) である。

5.3.2.4 孔曲り検層結果

14MI49 号孔の孔曲り検層結果を表 5.3.2-3 に示す。掘削中に 5m に 1 回程度の頻度で孔曲り検層を 実施した。

本孔における孔跡は、掘削角度は計画の-31°に対して若干上向き(-30~-29°)に変位した。掘削 方向は計画の S81°Wに対して大きな変位はなかった。

孔 No.	測定月日	掘削深度 (mabh)	孔曲り 測定深度 (mabh)	測定方向 (水平より 下向き)	測定方位 (磁北基準)	偏差角	測定基準 (真北基準)
14MI49	12月8日	6.45	6.00	30°	S87° W	7°	S80° W
	12月9日	10.45	10.00	30°	S87° W	7°	S80° W
	12月9日	15.75	15.00	29°	S87° W	7°	S80° W
	12月10日	20.45	20.00	29°	S88° W	7°	S81°W
	12月11日	22.45	22.00	29°	S87°W	7°	S80° W

表 5.3.2-3 14MI49 号孔孔曲り検層結果

5.3.2.5 キャリパー検層結果

掘削終了後に孔径を把握するためにキャリパー検層を実施した。14MI49 号孔のキャリバー検層結果 を図 5.3.2-20 に示す。

4.90mabh まで孔ロケーシング~フロートシュー~セメンチング部である。5.50mabh 付近で孔径が 1mm 程度拡孔しているが、これは5.45mabh で幅 4mm 程度、細礫~粘土化していた部分に該当すると考 えられる。7.50~8.30mabh にわたり孔径が 1mm 程度拡孔しているが、これは7.55~8.11mabh で観察 された断層角礫岩にあたる。12.30mabh 付近で若干縮孔しているが、コア観察やボーリング掘削記録 にそれと関連するものはない。なお、深度が浅くなるにつれてロッドの出し入れの頻度が高くなるた め、一般には浅部では孔径がやや大きくなる傾向があるが、本孔ではその傾向は認められない。



図 5.3.2-20 14MI49 号孔キャリパー検層結果

5.3.2.6 BTV・フローメータ検層結果

14MI49 号孔のフローメータ検層結果の一覧を表 5.3.2-4 に、検層結果を図 5.3.2-21 に示す。14MI49 号孔のフローメータ検層の結果から流量変化が見られた深度は、14.4~14.6mabh、14.7~15.1mabh、 15.4~15.9mabh の 3 深度であった。

流量変化が認められた 3 深度のうち 14.4~14.6mabh 間には BTV から 1 本の割れ目が認められ、流量 変化量は 1.5L/min であった。また、14.7~15.1mabh では BTV から 6 本の割れ目が認められ、流量変 化量は 3.0L/min であった。15.4~15.9mabh では、BTV から 3 本の割れ目が認められ、流量変化量は 1.8L/min であった。

これらフローメータ検層や間隙水圧モニタリング等の観測結果を踏まえ、14~16mabh、16~17mabh、 18~22.5mabh からの計5か所において透水試験を実施した。

孔名	検層区間 (mabh)	流量変化点 (mabh)	流量変化量 (L/min)	コア観察結果から一致 する割れ目番号
		14.4~14.6	1.5	1-8
	5.19~21.45			1″-4
				1″-5
				1-10
		14.7~15.1	3.0	1-11
14MI49				1″-6
				1″-7
				1-12
				1-14
		15.4~15.9	1.8	1″-9
				1-16

表 5.3.2-4 14MI49 号孔のフローメータ検層結果一覧



図 5.3.2-21 14MI49 号孔のフローメータ検層結果

5.3.2.7 透水試験結果(単孔式、孔間)

(1) 単孔式透水試験結果

試験対象とする割れ目は、コア観察やBTVの画像、フローメータ検層結果および掘削時の湧水量 変化より、12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔、14MI49 号孔の掘削(予定)箇所との連結性が 期待される 14~17mabh、18~22mabh 付近の割れ目を抽出した。

単孔式の透水試験は、抽出した割れ目の深度と湧水量を詳細に把握し、概略な透水量係数を得る 目的で実施し、その結果から孔間透水試験区間を選定した。単孔式透水試験の試験実施深度と湧水 量も関係図を図 5.3.2-22~図 5.3.2-26 に示し、試験結果を表 5.3.2-5 に示す。



図 5.3.2-22 14MI49 号孔 18~22mabh 付近の単 孔式透水試験深度図



図 5.3.2-23 14MI49 号孔 16mabh 付近の単孔式 透水試験深度図



図 5.3.2-24 14MI49 号孔 15.5mabh 付近の単孔 式透水試験深度図



図 5.3.2-25 14MI49 号孔 15.0mabh 付近の単孔

式透水試験深度図



図 5.3.2-26 14MI49 号孔 14.5mabh 付近の単孔式透水試験深度図

試験番号	孔間透水試験 試験番号	試験深度		区間長		透水量係数	湧水量	水圧
		上端 mabh	下端 mabh)	m	割れ目番号	m²/sec	L/min	mH₂O
透水1 ※	No.1	18.50	22.47	3.97	1-30~1-34, 2-1~2-14	5.33E-07	10.90	1.4957
透水2 ※	No.6	17.40	18.07	0.67	1-24~1-26	9.75E-09	0.20	
透水3 ※	No.2	16.30	16.97		1-19~1-21	7.02E-08	1.40	1.4526
透水4	_	16.05	16.72		1-18~1-20, 1'-1	6.54E-08	1.30	
透水5	—	15.85	16.52		1-17~1-20, 1'-1	6.54E-08	1.30	
透水6	—	15.65	16.32		1-16~1-20, 1'-1	3.01E-08	0.60	
透水7	—	15.20	15.87		1-14~1-16	1.62E-07	3.30	1.4847
透水8 ※	No.3	15.05	15.72		1-14~1-16	1.62E-07	3.30	
透水9	—	15.00	15.67		1-14~1-15	2.21E-07	4.50	
透水10 ※	No.4	14.80	15.47		1-10~1-13	1.77E-07	3.60	1.4807
透水11	_	14.65	15.32		1-9~1-13	1.87E-07	3.80	
透水12	_	14.10	14.77		1-8~1-9	5.90E-08	1.20	1.4847
透水13 ※	No.5	14.00	14.67		1-8	4.93E-08	1.00	

表 5.3.2-5 14MI49 号孔単孔式透水試験の結果

※ 孔間透水試験の実施区間

(2) 孔間透水試験結果

単孔式透水試験結果から選定した5深度(透水試験1,3,9,10,13)において孔間水理試験を実施 した。孔間透水試験は、試験番号 No.1~5の全試験で定流量揚水試験を実施した。また、試験中は 間隙水圧モニタリング装置のサンプリングインターバルを5秒に変更して孔間透水試験時の水圧応 答を計測した。

a. No.1 区間(18.50~22.47mabh)の透水試験結果

No.1 区間の湧水量は 10.90L/min であり、揚水量 2.00L/min の定流量揚水試験を実施した。

試験区間 P2 の圧力変化を図 5.3.2-27 に示す。揚水試験時の P2 水頭差は 8.59mH20 であった。

揚水過程の Derivative Plot を図 5.3.2-28 に、Jacob 法による解析結果を図 5.3.2-29 に、回復 過程の Derivative Plot を図 5.3.2-30 に、Agarwal 法による解析結果を図 5.3.2-31 に示す。揚水 過程において、図 5.3.2-29 に示す直線勾配から Jacob の式を用いて透水量係数 *T* を求めると *T*=5.45E-05(m²/sec)が得られた。また、回復過程においても図 5.3.2-31 に示す直線勾配から Agarwal の式を用いて透水量係数 *T*を求めると *T*=3.63E-05(m²/sec)が得られた。

揚水期間中の間隙水圧応答に脈動がみられたため、No.1の試験区間における透水量係数の代表値は、Agarwalの式による *T*=3.63E-05(m²/sec)とした。

12MI30 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-32 に、12MI31 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-33 に、 13MI36 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-34 に、13MI37 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-35 に示 す。

No.1 透水試験時で最も水圧が応答した区間は 12MI31 号孔の Int1 や、12MI30 号孔の Int2, Int3、 13MI37 号孔の Int1 であったがいずれも微小である。







図 5.3.2-28 14MI49 号孔 No.1 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot















図 5.3.2-32 14MI49 号孔 No.1 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.2-33 14MI49 号孔 No.1 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.2-34 14MI49 号孔 No.1 区間定流量揚水試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.2-35 14MI49 号孔 No.1 区間定流量揚水試験時の 13MI37 号孔の水圧応答結果図

No.2 区間の湧水量は 1.41L/min であり、揚水量 0.30L/min の定流量揚水試験を実施した。

b. No.2 区間(16.30~16.97mabh)の透水試験結果

試験区間 P2 の圧力変化を図 5.3.2-36 に示す。揚水試験時の P2 水頭差は 19.30mH₂0 であった。 揚水過程の Derivative Plot を図 5.3.2-37 に、Jacob 法による解析結果を図 5.3.2-38 に、回復 過程の Derivative Plot を図 5.3.2-39 に、Agarwal 法による解析結果を図 5.3.2-40 に示す。揚水 過程において、図 5.3.2-38 に示すように直線勾配が見出され、Jacob の式を用いて透水量係数 *Tを* 求めると *T*=2.94E-06 (m²/sec)が得られた。また、回復過程において図 5.3.2-40 に示す直線勾配か ら Agarwal の式を用いて透水量係数 *T*を求めると *T*=2.87E-06 (m²/sec)が得られた。No.2 の試験区間 における透水量係数の代表値は、Jacob の式、Agarwal の式でほぼ同値が得られたため、より大き い値を示す Jacob の式の 2.94E-06 (m²/sec) とした。

12MI30 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-41 に、12MI31 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-42 に、 13MI36 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-43 に、13MI37 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-44 に示 す。

No.2 透水試験時で最も水圧が応答した区間は 12MI31 号孔の Int4, Int5 であった。


Derivative

図 5.3.2-37 14MI49 号孔 No.2 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot



図 5.3.2-38 14MI49 号孔 No.2 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果



図 5.3.2-39 14MI49 号孔 No.3 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot







図 5.3.2-41 14MI49 号孔 No.2 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.2-42 14MI49 号孔 No.2 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.2-43 14MI49 号孔 No.2 区間定流量揚水試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.2-44 14MI49 号孔 No.2 区間定流量揚水試験時の 13MI37 号孔の水圧応答結果図

c. No.3 区間(15.05~15.72mabh)の透水試験結果

No. 3 区間の湧水量は 3. 29 L/min であり、揚水量 0. 67L/min の定流量揚水試験を実施した。
試験区間 P2 の圧力変化を図 5. 3. 2-45 に示す。揚水試験時の P2 水頭差は 15. 43mH₂0 であった。
揚水過程の Derivative Plot を図 5. 3. 2-46 に、Jacob 法による解析結果を図 5. 3. 2-47 に、回復
過程の Derivative Plot を図 5. 3. 2-48 に、Agarwal 法による解析結果図を図 5. 3. 2-49 に示す。

揚水過程において、図 5.3.2-47 に示す直線勾配が見出され、Jacob の式を用いて透水量係数 *T*を 求めると *T*=8.49E-06(m²/sec)が得られた。また、回復過程においても図 5.3.2-49 に示す直線勾配 が見出すことができ、Agarwal の式を用いて透水量係数 *T*を求めると *T*=9.77E-06(m²/sec)が得られ た。

No.3の試験区間における透水量係数の代表値は、揚水過程における遠方の透水性を表す Jacob の 式による *T*=8.49E-06 (m²/sec) とした。

12MI30 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-50 に、12MI31 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-51 に、 13MI36 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-52 に、13MI37 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-53 に示 す。

No.3 透水試験時で最も水圧が応答した区間は 12MI31 号孔の Int4, Int5 であった。







図 5.3.2-46 14MI49 号孔 No.3 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot







図 5.3.2-48 14MI49 号孔 No.3 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot







図 5.3.2-50 14MI49 号孔 No.3 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.2-51 14MI49 号孔 No.3 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.2-52 14MI49 号孔 No.3 区間定流量揚水試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.2-53 14MI49 号孔 No.3 区間定流量揚水試験時の 13MI37 号孔の水圧応答結果図

d. No.4 区間(14.80~15.47mabh)の透水試験結果

No. 3 区間の湧水量は 3. 58L/min であり、揚水量 0. 60L/min の定流量揚水試験を実施した。 試験区間 P2 の圧力変化を図 5. 3. 2-54 に示す。揚水試験時の P2 水頭差は 11. 14mH₂0 であった。 揚水過程の Derivative Plot を図 5. 3. 2-55 に、Jacob 法による解析結果を図 3. 3. 7-35 に、回復 過程の Derivative Plot を図 5. 3. 2-57 に、Agarwal 法による解析結果図を図 5. 3. 2-58 に示す。

揚水過程において、図 5.3.2-56 に示す直線勾配が見出され、Jacob の式を用いて透水量係数 *T*を 求めると *T*=1.52E-05(m²/sec)が得られた。また、回復過程においても図 5.3.2-58 に示す直線勾配 が見出すことができ、Agarwal の式を用いて透水量係数 *T*を求めると *T*=7.63E-06(m²/sec)が得られ た。

No.3の試験区間における透水量係数の代表値は、揚水過程における遠方の透水性を表す Jacob の 式による *T*=1.52E-05(m²/sec)とした。

12MI30 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-59 に、12MI 31 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-60 に、 13MI36 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-61 に、13MI37 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-62 に示 す。

No.4 透水試験時で最も水圧が応答した区間は 12MI31 号孔の Int5 であった。



図 5.3.2-55 14MI49 号孔 No.4 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot



図 5.3.2-56 14MI49 号孔 No.4 区間定流量揚水試験の揚水過程の Jacob 法による解析結果



図 5.3.2-57 14MI49 号孔 No.4 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot







図 5.3.2-59 14MI49 号孔 No.4 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.2-60 14MI49 号孔 No.4 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.2-61 14MI49 号孔 No.4 区間定流量揚水試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.2-62 14MI49 号孔 No.4 区間定流量揚水試験時の 13MI37 号孔の水圧応答結果図

e. No.5 区間(14.00~14.67mabh)の透水試験結果

No.5 区間の湧水量は 1.04 L/min であり、揚水量 0.25L/min の定流量揚水試験を実施した。 試験区間 P2 の圧力変化を図 5.3.2-63 に示す。揚水試験時の P2 水頭差は 10.42mH₂0 であった。

揚水過程の Derivative Plot を図 5.3.2-64 に、Jacob 法による解析結果を図 5.3.2-65 に、回復 過程の Derivative Plot を図 5.3.2-66 に、Agarwal 法による解析結果図を図 5.3.2-67 に示す。

揚水過程において、図 5.3.2-65 に示す直線勾配が見出され、Jacob の式を用いて透水量係数 *Tを* 求めると *T*=1.82E-05(m²/sec)が得られた。また、回復過程においても図 5.3.2-67 に示す直線勾配 が見出すことができ、Agarwal の式を用いて透水量係数 *T*を求めると *T*=6.01E-06(m²/sec)が得られ た。

No.3の試験区間における透水量係数の代表値は、揚水過程における遠方の透水性を表す Jacob の 式による *T*=1.82E-05(m²/sec)とした。

12MI30 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-68 に、12MI 31 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-69 に、 13MI36 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-70 に、13MI37 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-71 に示 す。

No.5 透水試験時で最も水圧が応答した区間は 12MI31 号孔の Int5 であった。



図 5.3.2-64 14MI49 号孔 No.5 区間定流量揚水試験の揚水過程の Derivative Plot







図 5.3.2-66 14MI49 号孔 No.5 区間定流量揚水試験の回復過程の Derivative Plot



図 5.3.2-67 14MI49 号孔 No.5 区間定流量揚水試験の回復過程の Agarwal 法による解析結果



図 5.3.2-68 14MI49 号孔 No.5 区間定流量揚水試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.2-69 14MI49 号孔 No.5 区間定流量揚水試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.2-70 14MI49 号孔 No.5 区間定流量揚水試験時の 13MI36 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.2-71 14MI49 号孔 No.5 区間定流量揚水試験時の 13MI37 号孔の水圧応答結果図

f. No.6 区間(17.27~17.87mabh)の透水試験結果

No.6 区間は、14MI49 号孔の間隙水圧モニタリング装置(Int2)を用いて透水試験を実施したポイント希釈試験の結果から、当区間では地下水の流出入が極めて微小であると判断したため(「ポイント希釈試験結果」参照)、パルス試験を実施することにした。パルス試験時の Int2 の水頭差は、11.431mH₂0 であった(図 5.3.2-72)

パルス試験時の Hvorslev の解析結果を図 5.3.2-73 に示す。解析図より、透水量係数 T を求めると、T=5.38E-08(m²/sec)が得られた。

12MI30 号孔の水圧応答結果図を図 5.3.2-74 に、12MI31 号孔の水圧応答図を図 5.3.2-75 に、13MI36 号孔の水圧応答図を図 5.3.2-76 に、13MI37 号孔の水圧応答図を図 5.3.2-77 に示す。

水圧応答の詳細な水位低下量を表 5.3.2-7 に示す。No.6 の透水試験時では、12MI31 号孔の Int4 と 13MI36 号孔の Int3 に僅かながら応答が見受けられた。



図 5.3.2-72 14MI49 号孔 No.6 区間の試験時における圧力変化







図 5.3.2-74 14MI49 号孔 No.6 区間非定常試験時の 12MI30 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.2-75 14MI49 号孔 No.6 区間非定常試験時の 12MI31 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.2-76 14MI49 号孔 No.6 区間非定常試験時の 12MI36 号孔の水圧応答結果図



図 5.3.2-77 14MI49 号孔 No.6 区間非定常試験時の 12MI37 号孔の水圧応答結果図

g. 14MI49 号孔における孔間透水試験結果のまとめ

14MI49 号孔で実施した孔間透水試験結果一覧を表 5.3.2-6 および図 5.3.2-78 に、孔間透水試験 中に確認した 12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔、13MI37 号孔の圧力応答結果を表 5.3.2-7 に 示す。

孔間透水試験の結果、15mabh 以深では 10⁻⁵~10⁻⁶ m²/sec の透水量係数を示す箇所が最も多いこと が確認できた。また、圧力応答結果から複数の水理的な連続性が確認されたが、水理的に独立した 単一割れ目は確認できなかった。

計段포모	試験	深度	⇒睑士注	网长注	透水量係数	睑网体粉	初期間隙水圧	揚水量	区間湧水量
武贵田方	上端(mabh)	下端(mabh)	武殿力 法	所作/11/云	(m2/sec)	灯由休奴	Мра	(L/min)	(L/min)
N - 1	10.50	00.47		Jacob	5.45E-05	-	1 4057	2.00	10.00
INO. I	18.50	22.47		Agarwal	3.63E-05	-	1.4957	2.00	10.90
No 2	16.20	16.07		Jacob	2.94E-06	-	1 4526	0.20	1 / 1
110.2	10.30	10.97		Agarwal	2.87E-06	-	1.4520	0.30	1.41
No 2	15.05	15 72	定流量	Jacob	8.49E-06	-	1 4947	0.67	2.20
110.5	15.05	15.72	揚水試験	Agarwal	9.77E-06	-	1.4047		3.29
No.4	14.90	15.47		Jacob	1.52E-05	-	1 4907	0.00	2 5 9
N0.4	14.00	15.47		Agarwal	7.63E-06	-	1.4607	0.00	3.00
No 5	14.00	1467		Jacob	1.82E-05	-	1 4947	0.25	1.04
NO.5	14.00	14.07		Agarwal	6.01E-06	-	1.4047	0.25	1.04
No.6	17.27	17.87	非定常 試験	Hvorslev	5.38E-08		1.5711		0.0025

表 5.3.2-6 14MI49 号孔 孔間透水試験結果一覧表

1.12E-5m²/sec 1.07E-6m²/sec 1.12E-7m²/sec 1.2M130 2.91E-5m²/sec 1.07E-6m²/sec 2.31E-8m²/sec 1.2M130 2.14E-5m²/sec 1.77E-5m²/sec 1.06E-6m²/sec 1.38E+6m²/sec 3.63E-5m²/sec 1.58E-5m²/sec 1.58E-6m²/sec 1.38E+6m²/sec 3.63E-5m²/sec 5.38E-6m²/sec 1.38E+6m²/sec 1.3M130 3.63E-5m²/sec 5.38E-6m²/sec 1.38E+6m²/sec 1.3M130 3.63E-5m²/sec 5.38E-6m²/sec 1.32E+6m²/sec 1.3M130 3.63E-5m²/sec 5.38E-6m²/sec 1.32E+6m²/sec 1.3M130 3.63E-5m²/sec 5.38E-6m²/sec 1.32E+6m²/sec 1.3M130 3.63E-5m²/sec 5.38E-6m²/sec 1.3E-6m²/sec 1.3M130 3.63E-5m²/sec 5.38E-6m²/sec 1.3E-6m²/sec 1.3M130 3.63E-5m²/sec 5.38E-6m²/sec 5.30E-6m²/sec 1.3M130 3.63E-5m²/sec 5.30E-6m²/sec 5.30E-6m²/sec 1.3M130

図 5.3.2-78 孔間透水試験結果一覧図

		12MI30 (mH ₂ O)										
試験番号	Int1	Int2	Int3	Int4	Int5	Int6	Int7					
	25.53 ~24.92 (mabh)	24.22~24.52mabh	21.99~23.82mabh	20.79~20.19mabh	18.99~11.39mabh	10.19~9.59mabh	8.39~0.00mabh					
No.1 18.50~22.47mabh	\searrow	0.010	0.010	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし					
No.2 16.30~16.97mabh	\searrow	変化なし	変化なし	変化なし	0.013	変化なし	変化なし					
No.3 15.05~15.72mabh	\searrow	変化なし	変化なし	変化なし	0.019	0.013	変化なし					
No.4 14.80~15.47mabh	\searrow	変化なし	変化なし	変化なし	0.017	0.014	変化なし					
No.5 14.00~14.67mabh	\geq	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし					
No.6 17.27~17.87mabh	\geq	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし					

表 5.3.2-7	12MI30 号孔、	12MI31 号孔、	13MI36 号孔、	13MI37 号孔~	への圧力応答結果−	-覧表
-----------	------------	------------	------------	------------	-----------	-----

	12MI31 (mH ₂ O)								
試験番号	Int1 26.00~23.30(mabh)	Int2 22.93~22.63mabh	Int3 22.20~20.37mabh	Int4 19.17~18.07mabh	Int5 16.87~16.27mabh	Int6 15.07~14.07mabh	Int7 12.87~7.77mabh	Int8 6.57~0.00mabh	
No.1 18.50~22.47mabh	0.011	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	
No.2 16.30~16.97mabh	変化なし	変化なし	0.015	0.028	0.030	変化なし	変化なし	変化なし	
No.3 15.05~15.72mabh	変化なし	変化なし	0.017	0.025	0.030	変化なし	変化なし	変化なし	
No.4 14.80~15.47mabh	変化なし	変化なし	0.020	0.038	0.068	変化なし	変化なし	変化なし	
No.5 14.00~14.67mabh	変化なし	変化なし	変化なし	0.012	0.020	変化なし	変化なし	変化なし	
No.6 17.27~17.87mabh	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	

		13MI36 (mH ₂ O)										
試験番号	Int1 20 17~19 82 (mabb)	Int2	Int3	Int4	Int5	Int6	Int7					
No 1	20.17**15.02 (IIIabil)	10.02 + 10.02 mapri	10.02 + 15.00mabri	10.10**14.00/1/a0/1	14.40° + 15.02mapri	12.02 + 0.0211a011	0.02**0.0011a011					
18.50~22.47mabh	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし					
No.2 16.30~16.97mabh	変化なし	0.011	変化なし	0.015	変化なし	変化なし	変化なし					
No.3 15.05~15.72mabh	変化なし	0.012	0.011	0.020	変化なし	変化なし	変化なし					
No.4 14.80~15.47mabh	変化なし	0.011	0.012	0.025	変化なし	変化なし	変化なし					
No.5 14.00~14.67mabh	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし					
No.6 17.27~17.87mabh	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし					

	13MI37 (mH ₂ O)							
試験番号	Int1 25.45~24.62mabh	Int2 23.42~22.82mabh	Int3 21.62~20.52mabh	Int4 19.32~18.45mabh	Int5 18.05~17.75mabh	Int6 17.35~12.72mabh	Int7 11.52~6.92mabh	Int8 5.72 ~ 0.00mabh
No.1 18.50~22.47mabh	0.010	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし
No.2 16.30~16.97mabh	変化なし	変化なし	変化なし	0.012	0.017	変化なし	変化なし	変化なし
No.3 15.05~15.72mabh	変化なし	変化なし	変化なし	0.013	0.018	変化なし	変化なし	変化なし
No.4 14.80~15.47mabh	変化なし	変化なし	変化なし	0.015	0.021	変化なし	変化なし	変化なし
No.5 14.00~14.67mabh	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし
No.6 17.27~17.87mabh	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし

5.3.3 ボーリング孔跡

5.3.3.1 高精度孔曲り検層結果

高精度孔曲り検層は、既存ボーリング孔の 13MI37 号孔と新規掘削した 14MI49 号孔の計 2 孔で実施 した。図 5.3.3-2~図 5.3.3-5 に 0.5m 毎に求めた方位角と傾斜角を基にしたボーリング孔跡を示す。 検層には、傾斜センサー精度±0.1°、方位センサー精度±0.3°、分解能(傾斜、方位角) 0.01° と高精度な村田式デジタルオンラインシステムを用いた。計測状況を図 5.3.3-1 に示す。孔曲り計測 は、孔口の掘削深度 0mabh を計測開始の 0 点と設定し、0.5mabh ごとに計測した。



図 5.3.3-1 デジタルオンラインシステムによる高精度孔曲がり検層計測状況



図 5.3.3-2 13MI37 号孔のボーリング孔跡図(左右変位推移)







図 5.3.3-4 14MI49 号孔のボーリング孔跡図(左右変位推移)



図 5.3.3-5 14MI49 号孔のボーリング孔跡図(上下変位推移)

5.3.3.2 掘削方向の測量結果

ボーリング方向の測量結果を表 5.3.3-1 に示す。

孔名	測量点	X 座標 (mm)	Y 座標 (mm)	Z 座標※ (mm)	鉛直角度 ()内は計算値	水平角度
1200	1	-69045283	6420773	-299759	35° N 80.0° N	
1210130	2	-69045235	6421045	-299566	(35.0°)	N 00.0 W
1014101	1	-69046426	6420134	-299729	36°	N 74.3°W
1210131	2	-69046392	6420255	-299.641	(34.9°)	
1214126	1	-69048811	6419058	-299735	34°	N 75.0° W
1310130	2	-69048731	6419377	-299509	(34.5°)	N 75.9 W
1214127	1	-69047522	6419679	-299691	41°	
131/1137	2	-69047477	6419886	-299502	(41.7°)	IN //./ W

表 5.3.3-1 測量結果

※ 基準点を GL-300000mm とした

(1) 傾斜角

傾斜角は、座標測量の結果から算出する方法と直接ロッドに角度測定器を当てて測定する方法の 2 ケースで求めた。それぞれの結果の差は最大で1°程度(12MI31 号孔)であった。

(2) 方位角

方位角は各孔のロッドの天端に設置した2点の測量点を座標測量することで求めた。 方位角の測量結果を図 5.3.3-6 に示す。



5.3.3.3 ボーリング孔跡計測結果

高精度孔曲がり検層の結果と測量結果を表 5.3.3-2 に示す。高精度孔曲がり検層と測量の結果では 全体に 2°程度の差が生じた。

	鉛直	角度	¥	水平	角度	¥
	測量	孔曲り検層	左	測量	孔曲り検層	左
12MI30	35° (35.0°)	33. 2°	2° (2°)	N 80.0° W	_	-
12MI31	36° (34.9°)	33. 6°	2° (1°)	N 74.3° W	_	-
13MI36	34° (34. 5°)	32. 7°	1° (2°)	N 75.9° W	_	-
13MI37	41° (41.7°)	40. 3°	1° (2°)	N 77.7°W	N 79.6°W	2°

表 5.3.3-2 測量結果と高精度孔曲り検層結果との差

※ 上表の孔曲り検層結果は、12MI30、12MI31、13MI36 号孔はジャイロ、13MI37 はデジタルオンラ インによる 高精度孔曲がり検層の結果と測量の結果で差が生じた理由として、以下のことが考えられる。

- 測量はボーリング孔そのものではなく、モニタリング装置として設置したロッドを計測しており、ロッド自体に歪みや撓みは加味していない。
- ④ 傾斜した筒状のロッドの天端に寸分のズレなく測量ターゲットを設置することが困難である。
- ③ ロッドに設けた2点の測量点の距離が近接しており、その結果、①に述べた測量誤差が大きく出る可能性がある(距離を離すためにロッドを長くすればロッドが撓んでしまうため、距離の調整は出来なかった)。

先述の通り、計測結果によって差が生じたが、本報告書では表 5.3.3-3 に示す計測結果を用いた。

	鉛直角	水平角度
	()は計測方法	()は計測方法
101/100	33.2°	N 80.0°W
12101130	(孔曲がり検層)	(測量)
1014101	33.6°	N 74.3°W
12111131	(孔曲がり検層)	(測量)
1214126	32.7°	N 75.9°W
1 3101130	(孔曲がり検層)	(測量)
1014107	40.3°	N 79.6°W
1 3101137	(孔曲がり検層)	(孔曲がり検層)
1414140	29.8°	N 80.2°W
141/1149	(孔曲がり検層)	(孔曲がり検層)

表 5.3.3-3 本報告書で用いたボーリング掘削方向

5.3.4 高解像度 BTV 検層結果

高解像度 BTV 検層は、既存ボーリング孔の 13MI37 号孔と新規掘削した 14MI49 号孔の計 2 孔で実施 した。

5.3.4.1 割れ目の分布

調査結果は、割れ目の開口の有無や鉱物の充填の有無などを問わず「全岩盤分離面」として整理した。また、全岩盤分離面のうち開口しているものを「開口割れ目」とし、それ以外を「割れ目」とした。BIPS 計測した 13MI37 号孔、14MI49 号孔の孔内展開画像を割れ目の方向と共にそれぞれ図 5.3.4-1 ~図 5.3.4-12 に示す。

各孔の全岩盤分離面の分布状況を表 5.3.4-1 に示す(平成 25 年度に実施した 12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔を含む)。13MI36 号孔、13MI37 号孔および 14MI49 号孔の岩盤分離面の密度は、12MI30 号孔や 12MI31 号孔に比べて小さく、岩盤分離面の平均間隔は大きい。この結果について、13MI36 号 孔と 14MI49 号孔では、共に掘削長が短いことから、割れ目が相対的に多くなる手前で掘削を終えたた めであると考えられる。13MI37 号孔については、岩盤分離面の空間的な集中度(離散度)がわずかな がら違う可能性がある。

岩盤分離面の方向ならびに分布特性については後述する。

孔	計測区間長	全岩盤分離面	割れ目	開口割れ目	岩盤分離面 の分布密度	岩盤分離面 の平均間隔
12MI30	22.50m	169	162	7	7.51/m	0.13m
12MI31	21.00m	165	158	7	7.86/m	0.13m
13MI36	17.53m	121	112	9	6.90/m	0.14m
13MI37	22.62m	130	127	3	5.75/m	0.17m
14MI49	17.51m	95	95	0	5.43/m	0.18m

表 5.3.4-1 各孔の全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目計測結果

※ 岩盤分離面の平均間隔: 孔内の岩盤分離面の深度を a、b、c・・・Z とした場合、b の岩盤割れ 目の間隔は(c-a)/2 である。a~z の岩盤分離面の間隔を平均したものを岩盤分離面の平均間隔 とした。







•

•



図 5.3.4-313MI37 号孔 孔壁展開図 8.00~12.00mabh







- 5-143 -


0



図 5.3.4-7 13MI37 号孔 孔壁展開図 24.00~26.00mabh (撮影は 25.26mabh まで)



図 5.3.4-8 14MI49 号孔 孔壁展開図 4.00~8.00mabh (撮影は 4.45mabh から)



図 5.3.4-9 14MI49 号孔 孔壁展開図 8.00~12.00mabh

0





図 5.3.4-11 14MI49 号孔 孔壁展開図 16.00~20.00mabh

0



図 5.3.4-12 14MI49 号孔 孔壁展開図 20.00~23.00mabh (撮影は 22.32mabh まで)

5.3.4.2 割れ目の方向

13MI37 号孔、14MI49 号孔に認められた全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目を統計的に整理した結 果を図 5.3.4-13~図 5.3.4-18 に示す。また、各孔の全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目の主な卓越 方向を表 5.3.4-2 に示す(平成 25 年度に実施した 12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔を含む)。 全岩盤分離、割れ目、開口割れ目の主な卓越方向は、各孔ともにほぼ同じである。これらの第1 卓越 方向は第2、第3 卓越方向に比較して相対的に集中度が高いが、第1 卓越方向がボーリングの掘削方 向とほぼ直交するため、孔と遭遇する確率が高いことの影響も受けていると考えられる。これに対し て第2、第3 卓越方向を構成する NE 走向高傾斜および水平な全岩盤分離面は、よりボーリング孔に対 して小さい角度で交差するために卓越度が相対的に低くなった可能性もある。

孔	全岩盤分離面の	割れ目の第1卓	開口割れ目の第1	全岩盤分離面の第
	第1卓越方向	越方向	卓越方向	2、第3卓越方向
12MI30	N19W/88E (31%)	N18W/89E(31%)	N23W/85E(42%)	N47E/77EW(3%)
				N5W/19E(3%)
12MI31	N19W/85E (38%)	N17W/85E(39%)	N24W/87E(42%)	N45E/73EW(3%)
				N45W/15NE(3%)
13MI36	N20W/87E (28%)	N20W/87E (28%)	N25W/87E(24%)	N35E/77EW(4%)
				N5W/15E(4%)
13MI37	N17W/88E (29%)	N17W/88E (29%)	該当なし	N52W/8NE(5%)
				N42E/70SE(5%)
14MI49	N19W/85W (33%)	N19W/85W (33%)	該当なし	N43E72SE(5%)
				N51W9NE (9%)

表 5.3.4-2 各孔の全岩盤分離面、割れ目、開口割れ目の主な卓越方向

()はステレオネットのポイントカウティングの集中度を示し、大きいほど集中度が高い。



図 5.3.4-13 13MI37 号孔 ステレオネット図 - 全不連続面-



図 5.3.4-14 13MI37 号孔 ステレオネット図 - 割れ目-



図 5.3.4-15 13MI37 号孔 ステレオネット図 - 開口割れ目-



図 5.3.4-16 14MI49 号孔 ステレオネット図 - 全不連続面-



図 5.3.4-17 14MI49 号孔 ステレオネット図 - 割れ目-



図 5.3.4-18 14MI49 号孔 ステレオネット図 - 開口割れ目-

5.3.4.3 割れ目の分布特性

ボーリング孔内に分布する割れ目には離散的である一方で、割れ目が集中する箇所も認められる。 図5.3.4-19~図5.3.4-20に岩盤分離面の間隔、深度-方位分布および深度-傾斜分布をそれぞれ示す。 岩盤分離面の間隔は、孔における割れ目の分布は均質ではなく集中箇所が偏在するクラスター的な分 を呈する。岩盤分離面の集中箇所を抜き出し、それらを構成する岩盤分離面の方向を整理した。各孔 の全岩盤分離面の集中箇所とその主な方向を表5.3.4-3に示す(平成25年度実施した12MI30号孔、 12MI31号孔、13MI36号孔を含む)。割れ目の集中箇所の多くは、孔全体の岩盤分離面の方向をステレ オネットで統計処理した際の第1卓越方向にあたるNNW系の岩盤分離面で構成される。これに比べて H(水平~緩傾斜)系やNE系の岩盤分離面はより離散的である。ただし、H系の岩盤分離面が NNW系 に比べてより多く占める箇所もある(12MI30号孔の区間②、13MI36号孔の区間①)。H系の岩盤分離 面は NNW系やNE系と比べて孔との遭遇率が低いことを考慮すれば、こうした個所については、H系の 岩盤分離面がより高い空間分布密度を有する可能性がある。

孔	区間①	区間②	区間③	区間④	区間⑤	区間⑥	区間⑦
12MT30	5.70	7.40	18.20	21.90	22.80	24.60	26.50
120100	-6.30mabh	-7.80mabh	-18.50mabh	-22.00mabh	-23.60mabh	-25.00mabh	-27.10mabh
	NNW	H, NNW	NNW	NNW, H	NNW, NE	NNW	NNW
12MI31	5.50	8.00	17.40	21.40	24.10	25.20	
120101	-6.80mabh	-9.50mabh	-17.60mabh	-21.90mabh	-24.70mabh	-25.80mabh	
	NNW, H	NNW, NE	NNW	NNW	NNW	NNW, H	
13MI36	5.90	7.30	14.40	17.80	19.10		
	-6.30mabh	-8.20mabh	-15.30mabh	-18.50mabh	-19.70mabh		
	H, NNW	NNW, H	NNW	NNW	NNW		
13MI37	5.20	9.20	16.9	20.3	22.6		
	-6.60mabh	-9.70mabh	-18.3mabh	-21.3mabh	-23.5mabh		
	NNW、H、NE	NNW, NE	NNW, H	NNW, H	NNW		
14MI49	6.90	14.60	18.40				
	-8.20mabh	-16.2mabh	-20.20				
	NNW, NE	NNW, H	NNW				

表 5.3.4-3 各孔の全岩盤分離面の集中箇所とその主な方向

※ 区間の下の数字は孔口距離を示す(単位mabh)。

※ NNW: N20W/85Eの方向を中心として分布する割れ目。孔全体では第1卓越方向で、最も遭遇確率が 大きい。

※ H:主に水平から30度以下の緩傾斜(主にE~SE傾斜)を中心として分布する割れ目。孔全体では第 2もしくは第3卓越方向でNNW系、NE系の主要に比べて遭遇確率が低い。

※ NE: N45E~N35E /75EW の方向を中心として分布する割れ目。孔全体では第2もしくは第3越方向 で、遭遇確率はNNW 系より低く、水平系に比べて遭遇確率が高い(13MI37号孔については水平系の 遭遇率の方が高い)。





※ 青丸の塗りつぶしは開口割れ目。

- ※ Y 軸の方位は、0°は NS 走向、±90°は EW 走向を示し、0°~90°までの正の値が NW 走向、0°~-90°までの負の値が NE 走向の値を示す。
- ※ Y 軸の方位は、0° は水平、±90° は鉛直傾斜を示し、0° ~90° までの正の値が E 傾斜(もし くは NE 傾斜)、0° ~-90° までの負の値が W 傾斜(もしくは NW 傾斜)を示す。





※ Y 軸の方位は、0°は NS 走向、±90°は EW 走向を示し、0°~90°までの正の値が NW 走向、0°~-90°までの負の値が NE 走向の値を示す。

※ Y 軸の方位は、0° は水平、±90° は鉛直傾斜を示し、0° ~90° までの正の値が E 傾斜(もし くは NE 傾斜)、0° ~-90° までの負の値が W 傾斜(もしくは NW 傾斜)を示す。

5.3.4.4 割れ目の開口幅

割れ目の開口幅の計測については、水理試験によって透水性が相対的に大きく、湧水のある割れ目 について、その開口幅(間隙幅)を計測した図 5.3.4-21~図 5.3.4-34 に 13MI37 号孔、14MI49 号孔の 開口幅を HR-BTV 画像とともに示す。また、表 5.3.4-4 に割れ目開口幅の計測結果一覧を示す(平成 25 年度実施した 12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔を含む)。開口が認められる割れ目の多くは、 各孔の全岩盤分離面の第 1 卓越方向と同じ NNW の走向で高傾斜であるが、水平な開口割れ目や、NE 走 向で高傾斜も認められる。これらの割れ目の最大の開口幅は、0.56 mm (14MI49 孔の③開口割れ目)で ある。開口幅が 0.1mm 以下の割れ目については、孔壁面全体で連続して開口していることは希であり、 鉱物充填や上下盤が密着していることによって開口が認められない箇所もあり、部分的な開口となっ ている場合が多いことが確認できた。

孔番	開口割れ目	開口割れ目	開口割れ目	開口割れ目	開口割れ目	開口割れ目	開口割れ目
	1	2	3	4	5	6	\bigcirc
	10.11 m	20.66 m	21.00 m	22.53 m	24.67 m	27.08 m	—
12MI30	N78W/14N	N86W/73N	N87W/84N	N29W/86E	N9W/73E	N27W/80E	_
	0.18 mm	0.11 mm	0.09 mm	0.08 mm	0.05 mm	0.03 mm	_
	14.88 m	16.93 m	20.59 m	21.89 m	22.74 m	24.15 m	—
12MI31	N45W/83SW	N17W/88E	N25W/85E	N29W/88E	N8E/22E	N10W/83W	_
	0.11 mm	0.13 mm	0.13 mm	0.15 mm	0.09 mm	0.06 mm	
	14.58 m	15.15 m	16.08 m	17.7 m	18.08 m	21.11 m	—
13MI36	N34W/83SW	N29W/83E	N34W/83SW	N22W/83E	N24W/89E	N5W/21E	_
	0.08 mm	0.03 mm	0.46 mm	0.30 mm	0.38 mm	0.02 mm	
	19.14 m	20.53 m	20.74 m	20.81 m	21.01 m	21.28 m	23.12 m
13MI37	N65W/89N	N13W/17E	N20W/79E	N36W/85NE	N25W82E	N34W/89NE	N26W/80E
	0.03 mm	0.29 mm	0.33 mm	0.31 mm	0.62 mm	0.19 mm	0.70 mm
	14.55 m	14.91 m	14.98 m	15.55 m	16.15 m	16.45 m	22.37 m付近
14MI49	N70W/12N	N24W/84E	N19W/86E	N32W/88SW	N5W5E	N66W/8N	_
	0.08 mm	0.44 mm	0.56 mm	0.38 mm	0.03 mm	0.09 mm	0.52 mm

表 5.3.4-4 割れ目開口幅の計測結果一覧



図 5.3.4-21 13MI37 号孔 詳細観察画像 (19.14mabh、N65W/89N)



図 5.3.4-22 13MI37 号孔 詳細観察画像 (20.35mabh、N13W/17E)



図 5.3.4-23 13MI37 号孔 詳細観察画像 (20.74mabh、N20W/79E)



図 5.3.4-24 13MI37 号孔 詳細観察画像(20.81mabh、N36W/85NE)



図 5.3.4-25 13MI37 号孔 詳細観察画像(21.01mabh、N25W/82E)



図 5.3.4-26 13MI37 号孔 詳細観察画像(21.28mabh、N34W/89NE)



図 5.3.4-27 13MI37 号孔 詳細観察画像 (23.12mabh、N26W/80E)



図 5.3.4-28 14MI49 号孔 詳細観察画像(14.55mabh、N70W/12N)



図 5.3.4-29 14MI49 号孔 詳細観察画像 (14.91mabh、N24W/84E)



図 5.3.4-30 14MI49 号孔 詳細観察画像(14.98mabh、N19W/86E)



図 5.3.4-31 14MI49 号孔 詳細観察画像(15.55mabh、N32W/88SW)



図 5.3.4-32 14MI49 号孔 詳細観察画像 (16.15mabh、N5W/5E)



図 5.3.4-33 14MI49 号孔 詳細観察画像 (16.45mabh、N66W/8N)



図 5.3.4-34 14MI49 号孔 詳細観察画像(22.37mabh 付近)

5.3.5 ポイント希釈試験結果

5.3.5.1 試験概要

ポイント希釈試験は、13MI37 号孔と 14MI49 号孔に設置した間隙水圧モニタリング装置の観測区 間で実施した。試験実施概要を表 5.3.5-1 に、試験実施概念図を図 5.3.5-1 に示す。試験の対象と した区間は、コア観察の結果や BTV・フローメータ検層、掘削時の湧水量の変化、間隙水圧モニタ リング結果等から選定した。各孔試験の実施位置と間隙水圧モニタリング装置の配置状況を図 5.3.5-3 および図 5.3.5-4 に示す。

なお、平成25年度に実施したポイント希釈試験ではウラニン濃度が3mg/L以上になると濃度が 高くなるに従い蛍光強度が減少し、測定精度が悪くなることが確認されたことから、今年度の調査 ではウラニン濃度を3mg/L以下に調整した。

試験名			D7M3	D7M4	D7M5	D7M6
対象区間		Int2	Int3	Int4	Int5	
計時反問	上端深度	mabh	22. 820	20. 520	18. 450	17. 750
こう こうちょう こうしょう こうしょう しんしょう しんしょう こうしん いっぽう こうしん いっぽう しんしょう いんしょう しんしょう しんしょう いんしょう いんしょう ひんしょう いんしょう ひんしょう いんしょう ひんしょう ひんしょ ひんしょ ひんしょ ひんしょう ひんしょう ひんしょう ひんしょう ひんしょう ひんしょう ひんしょう ひんしょう ひんしょ ひんしょ ひんしょ ひんしょ ひんしょ ひんしょ ひんしょ ひんしょ	下端深度	mabh	23. 420	21.620	19. 320	18.050
	開始	-	11/17 17:15	11/19 9:00	11/20 10:34	11/19 15:55
試験時間	終了	_	11/18 9:15	11/19 13:20	11/21 8:20	11/20 8:00
	実施時間	_	16:00	4:20	21:46	16:05
トレーサー	ウラニン	mg/L	2.99	3. 04	2.99	3.04
世长七三	C1	-	Ver.2.0	Ver.2.0	使用不可	使用不可
風元セル	C2	_	Ver.2.0	Ver. 2.0	Ver.2.0	Ver.2.0
条件	循環流量	mL/min	77	503	300	104

表 5.3.5-1 ポイント希釈試験実施概要(13MI37 号孔)

※ C1の蛍光濃度センサーは 13MI37 号孔試験中に破損したため、途中からは C2 蛍光濃度センサーの みで試験を実施した。

表 5. 3. 5-2 ポイント希釈試験実施概要(1	14MI49 둥	テ孔)
----------------------------	----------	-----

試験名			D9M7	D9M8	D9M9
対象区間			Int2	Int3	Int4
計除区間	上端深度	mabh	17. 265	15. 395	14. 730
武殿区间	下端深度	mabh	17.865	16.065	15. 030
	開始	-	11/23 14:00	11/21 14:15	11/20 17:45
試験時間	終了	-	11/26 8:44	11/22 8:05	11/21 8:00
	実施時間	_	66:44	17:50	14:15
トレーサー	ウラニン	mg/L	3. 10	2.99	2.99
出生する	C1	-	使用不可	使用不可	使用不可
重元セル	C2	-	Ver.2.0	Ver.2.0	Ver.2.0
条件	循環流量	mL/min	43	217	212

※ C1の蛍光濃度センサーは破損したため、C2 蛍光濃度センサーのみで試験を実施した。



図 5.3.5-1 ポイント希釈試験実施概念図 (観測区間に対し、センサーC1 は上流側、センサーC2 は下流側となる)



図 5.3.5-2 ポイント希釈試験状況



図 5.3.5-3 13MI37 号孔試験実施位置と間隙水圧モニタリング装置の配置



図 5.3.5-4 14MI49 号孔試験実施位置と間隙水圧モニタリング装置の配置

5.3.5.2 試験結果

(1) 検量線作成結果

検量線作成結果を図 5.3.5-5 および図 5.3.5-6 に、使用した蛍光濃度測定装置の仕様を表 5.3.5-3 に示す。

蛍光強度からトレーサー濃度を算出するため検量線を作成した。

検量線の作成は孔内水を使用し、かつ一定の圧力(1.5MPa)条件下で計測したため、溶存ガス量 や水中に浮遊する微粒子気泡の濃度はポイント希釈試験時と同等であると考える。



(a) 蛍光濃度センサー(C1) 検量線

(b) 蛍光濃度センサー(C2) 検量線

図 5.3.5-5 ウラニン濃度の検量線(13MI37 号孔)



図 5.3.5-6 ウラニン濃度の検量線(14MI49 号孔)

^{※ 14}MI49 号孔での試験は、C1 の蛍光濃度センサー故障のため、C2 の蛍光濃度センサーでのみ実施した。

	表 5.3.5-3	F	レーサー濃	と度測定装置の仕様
--	-----------	---	-------	-----------

	光源器	受光器
センサーC1	470nm, LED1304702007	Avantes 社製, 0703039 U1
センサーC2	470nm, LED1304702008	Avantes 社製, 0703038 U1

(2) ポイント希釈試験結果

ポイント希釈試験時のウラニンの濃度変化と試験時の間隙水圧モニタリング結果を図 5.3.5-7~ 図 5.3.5-13 に示す。 センサーC1、センサーC2 ともに同時刻の蛍光強度は概ね近似した値が得られた。


図 5.3.5-7 ポイント希釈試験結果 D7M3 (13MI37 号孔 Int2)



図 5.3.5-8 ポイント希釈試験結果 D7M4 (13MI37 号孔 Int3)



図 5.3.5-9 ポイント希釈試験結果 D7M5 (13MI37 号孔 Int4)



図 5.3.5-10 ポイント希釈試験結果 D7M6 (13MI37 号孔 Int5)



図 5.3.5-11 ポイント希釈試験結果 D9M7 (14MI49 号孔 Int2)



図 5.3.5-12 ポイント希釈試験結果 D9M7 (14MI49 号孔 Int3)



図 5.3.5-13 ポイント希釈試験結果 D9M7 (14MI49 号孔 Int4)

ポイント希釈試験の対象区間容量と、トレーサー濃度の推移グラフ(対数グラフ)の直線部分の 傾きから、対象区間の地下水流量(自然流速)を算出した。地下水流量の算出式を式(1)、式(2)に 示す。

なお、計算に使用するトレーサー濃度の値は、全区間で計測結果がある C2 の蛍光濃度センサーの ものを使用した。

$$Q_{bh} = V \cdot \frac{d\ln\left(C/C_0\right)}{dt} \quad \cdot \quad \cdot \quad (1)$$

Q_{bh}:地下水流量(mL/min)

- V :区間容量(mL)
- C:時刻 t における試験区間内のトレーサー濃度(mg/L)
- C_0 :初期のトレーサー濃度(mg/L)
- *t* :時刻(min)

$$q_f = \frac{Q_{bh}}{\alpha \cdot 2r_{r}} \qquad \cdot \cdot \cdot (2)$$

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

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

ここで、ボーリング孔半径は0.043m、区間容量は試験区間毎に異なり表5.3.5-4に示す通りである。 また、初期濃度からの濃度変化の傾きは、実測値を基にした最小二乗法による線形近似から求めた。

対象孔			13N	1137		14MI49					
対象区間		Int2	Int3	Int4	Int5	Int2	Int3	Int4			
試験名		D7M3	D7M4	D7M5 D7M6		D9M7	D9M8	D9M9			
試験区間容量	(mL)	1,180	2,160	1,710	160	1,180	1,310	160			
チューブ容量	(mL)	1,100	1,050	1,050 1,000		970 830		770			
合計	(mL)	2,280	3,210	2,710	1,130	2,010	2,100	930			

表 5.3.5-4 各試験区間の区間容量

(4) 各試験における地下水流量の算出

a. D7M3 (13MI37 号孔 Int2)

D7M3 試験におけるトレーサー濃度の経時変化をLn(C/C₀)で整理したものを図 5.3.5-14 に示す。

自然状態での地下水通過流量および岩盤割れ目内の単位幅あたりに流れる地下水流量は、以下から 5.43 mL/min である。

$$Q_{bh} = V \times \frac{d \ln(C/C_0)}{dt} = 2280 \times 4.1 \times 10^{-4} \approx 9.3 \times 10^{-1}$$



 $q_f = \frac{Q_{bh}}{\alpha \times 2r} = \frac{9.3 \times 10^{-1}}{2 \times 0.086} = 5.43$

図 5.3.5-14 D7M3 トレーサー濃度の経時変化 (Ln(C/C₀))

b. D7M4 (13MI37 号孔 Int3)

D7M4 試験におけるトレーサー濃度の経時変化をLn(C/C₀)で整理したものを図 5.3.5-15 に示す。

自然状態での地下水通過流量および岩盤割れ目内の単位幅あたりに流れる地下水流量は、以下から 299 mL/min である。

$$Q_{bh} = V \times \frac{d \ln(C/C_0)}{dt} = 3210 \times 1.6 \times 10^{-2} \approx 5.1 \times 10^{1}$$
$$q_f = \frac{Q_{bh}}{\alpha \times 2r} = \frac{5.1 \times 10^{-1}}{2 \times 0.086} = 299$$



図 5.3.5-15 D7M4 トレーサー濃度の経時変化 (Ln(C/C₀))

c. D7M5 (13MI37 号孔 Int4)

D7M5 試験におけるトレーサー濃度の経時変化(希釈変化率)を Ln (C/C₀)で整理したものを図 5.3.5-16 に示す。なお、グラフ内における線形近似は最小二乗法を用いて求めた。

自然状態での地下水通過流量および岩盤割れ目内の単位幅あたりに流れる地下水流量は、以下から 7.41 mL/min である。

$$Q_{bh} = V \times \frac{d \ln(C/C_0)}{dt} = 2710 \times 4.7 \times 10^{-4} \approx 1.3 \times 10^{0}$$

$$q_f = \frac{Q_{bh}}{\alpha \times 2r} = \frac{1.3 \times 10^0}{2 \times 0.086} = 7.41$$



図 5.3.5-16 D7M5 トレーサー濃度の経時変化 (Ln(C/C₀))

d. D7M6 (13MI37 号孔 Int5)

D7M6 試験におけるトレーサー濃度の経時変化(希釈変化率)を Ln (C/C₀)で整理したものを図 5.3.5-17 に示す。

自然状態での地下水通過流量および岩盤割れ目内の単位幅あたりに流れる地下水流量は、以下から 4.47 mL/min である。

$$Q_{bh} = V \times \frac{d \ln(C/C_0)}{dt} = 1130 \times 6.8 \times 10^{-4} \approx 7.7 \times 10^{-1}$$



 $q_f = \frac{Q_{bh}}{\alpha \times 2r} = \frac{7.7 \times 10^{-1}}{2 \times 0.086} = 4.47$

図 5.3.5-17 D7M6 トレーサー濃度の経時変化 (Ln(C/C₀))

e. D9M7 (14MI49 号孔 Int2)

D9M7 試験におけるトレーサー濃度の経時変化(希釈変化率)を Ln (C/C₀)で整理したものを図 5.3.5-18 に示す。なお、D9M7 の試験では有意なトレーサー濃度の減衰は確認できておらず、この ことから、ほとんど地下水の流れが無いと評価した。

D9M7 での試験中のウラニン濃度は、試験開始直後では約 3.23mg/L であったのに対し、その後 1,000 分ほどかけて約 3.35mg/L まで上昇し、1,000 分後以降では連続的に微増し、試験終了時では 約 3.39mg/L 程度まで上昇している。

この濃度の上昇については、間隙水圧が変化したためと考える。

14MI49 号孔 Int2 における試験中の間隙水圧に着目すると、トレーサー置換開始、試験開始(循 環開始)のタイミングで水圧の振動が突発的に増大し、それ以降では連続的な圧力の増大が認めら れる。このことから、間隙水圧の変化がウラニン濃度に影響したと考える(図 5.3.5-19)。

- 5-190 -



図 5.3.5-18 D7M7 トレーサー濃度の経時変化 (Ln(C/C₀))



図 5.3.5-19 14MI49 号孔 Int2 における試験中の間隙水圧変動とトレーサー濃度

f. D9M8 (14MI49 号孔 Int3)

D9M8 試験におけるトレーサー濃度の経時変化(希釈変化率)を Ln (C/C₀)で整理したものを図 5.3.5-20 に示す。

自然状態での地下水通過流量および岩盤割れ目内の単位幅あたりに流れる地下水流量は、以下から 58.6 mL/min である。

$$Q_{bh} = V \times \frac{d \ln(C/C_0)}{dt} = 2100 \times 4.8 \times 10^{-3} \approx 1.0 \times 10^{10}$$
$$q_f = \frac{Q_{bh}}{\alpha \times 2r} = \frac{1.0 \times 10^1}{2 \times 0.086} = 58.6$$

- 5-191 -



図 5.3.5-20 D9M8 トレーサー濃度の経時変化 (Ln(C/C_o))

g. D9M9 (14MI49 号孔 Int4)

D9M9 試験におけるトレーサー濃度の経時変化(希釈変化率)を Ln (C/C₀)で整理したものを図 5.3.5-21 に示す。なお、グラフ内における線形近似は最小二乗法を用いて求めた。

自然状態での地下水通過流量および岩盤割れ目内の単位幅あたりに流れる地下水流量は、以下から 97.3 mL/min である。

$$Q_{bh} = V \times \frac{d \ln(C/C_0)}{dt} = 930 \times 1.8 \times 10^{-2} \approx 1.7 \times 10^{10}$$

$$q_f = \frac{Q_{bh}}{\alpha \times 2r} = \frac{1.7 \times 10^1}{2 \times 0.086} = 97.3$$



図 5.3.5-21 D9M9 トレーサー濃度の経時変化 (Ln(C/C₀))

(5) 地下水流量の算出結果

地下水流量の算出結果を表 5.3.5-5 に示す。

対象孔		13M	1137		
対象区間	Int2	Int2 Int3 Int4			
試験名	D7M3	D7M4	D7M5	D7M6	
トレーサー希釈変化(傾き)	-4.1E-04	-1.6E-02	-4. 7E-04	-6.8E-04	
自然通過流量 Q _{bh} (mL/min)	9. 3E-01	5. 1E+01	1.3E+00	7. 7E–01	
自然通過流量 q _f (mL/min/m)	5. 43	299	7. 41	4. 47	
対象孔					
対象区間	Int2	Int3	Int4		
試験名	D9M7	D9M8	D9M9		
トレーサー希釈変化(傾き)	—	-4.8E-03	-1.8E-02		
自然通過流量 Q _{bh} (mL/min)	_	1.0E+01	1. 7E+01		
自然通過流量 q _f (mL/min/m)	_	58.6	97.3		

表 5.3.5-5 地下水流量の算出結果一覧

また、地下水流量と透水量係数から、(3)の式を用いて動水勾配を算出した。動水勾配の算出 結果を表 5.3.5-6 に示す。

$$I = \frac{q_f}{T} \quad \dots \quad (3)$$

I :動水勾配

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

T :地下水流量(mL/min)

	対象孔		13MI37							
	対象区間		Int2	Int3	Int4	Int5				
	試験名		D7M3	D7M4	D7M5	D7M6				
透水試験	上端深度	(mabh)	22.80	21.20	18.70	17.70				
実施区間*	下端深度	(mabh)	23.47	21.87	19.37	18.37				
透水試験 結果	透水量係数	(m2/sec)	1.58E-05	3.08E-05	1.02E-05	1.06E-06				
	動水勾配		0.00573	0.162	0.0121	0.0702				

表 5.3.5-6 動水勾配の算出結果一覧

	対象孔		14MI49						
			Int?	Int4					
	一								
添水学段	上游灾奋	(mabb)	17.07	15.05	14.90				
迈尔武敏 安佐区即※	工物休及		17.27	15.00	14.00				
关加区间**	下垢深度	(mabh)	17.87	15.72	15.47				
透水試験 結果	透水量係数	(m2/sec)	5.38E-08	8.49E-06	1.52E-05				
	動水勾配		-	0.115	0.107				

※ 上表の透水試験結果は、対象と考える透水性割れ目を含む試験範囲のものを用いた。

5.3.6 孔底止水

5.3.6.1 12MI30 号孔止水作業結果

止水パッカーを指定の深度に設置するため、ケーシングログ(図 5.3.6-1)を作成し、このケーシングログに従い、止水パッカーを設置した。止水パッカーの設置深度を表 5.3.6-1 に示す。

表 5.3.6-1 12MI30 号孔の止水パッカー設置深度

止水パッカー上端深度	25.600mabh
止水パッカーゴム上端深度	25.855mabh
止水パッカーゴム下端深度	26.855mabh



図 5.3.6-1 12MI30 号孔ケーシングログ

止水パッカーの圧力は、湧水導水用配管のバルブ開放時で 2.8MPa になるように調整した。設置後から、パッカー拡張チューブ切り離しまでのパッカー圧の推移を図 5.3.6-2 に示す。

止水パッカーによる止水効果を確認するため、止水パッカー拡張前、拡張後およびロッド回収後に 孔口湧水量測定を実施した。表 5.3.6-2 に示す結果の通り、パッカー拡張後の湧水量はパッカー拡張 前に比べ約 55L/min 減少している。12MI30 号孔掘削時に実施された孔口湧水量測定の結果、孔底部の 27.00~27.50mabh 区間からの湧水量は 50.3L/min であり、ほぼ同程度の湧水量が減少したことで、十 分に止水ができていると判断した。その後、パッカー圧調整期間を経て、パッカー挿入ロッド類を止 水パッカーから切り離し、引上げ回収して作業を終了した。



図 5.3.6-2 12MI30 号孔止水パッカー圧の推移

	パッカー	- 拡張前	パッカー	一拡張後	ロッド回収後					
渔水号 测今	(8/22	13:39)	(8/22	14:05)	(8/26 11:08)					
伤水重肉足	時間	中日(1)	時間		時間					
	(sec)	谷重(L)	(sec)	谷童(L)	(sec)	谷重(L)				
1回目	8.15	8.50	10.00	1.57	10.00	1.53				
2回目	8.25	8.50	10.00	1.57	10.00	1.54				
3回目	8.00	8.50	10.00	1.58	10.00	1.55				
4回目	7.21	8.00	10.00	1.56	_	-				
5 回目	7.44 8.10		10.00	1.58	_	_				
湧水量(L/min)	64	. 0	9.	. 4	9.2					

表 5.3.6-2 12MI30 号孔の孔口湧水量測定結果

止水パッカーを指定の深度に設置するため、ケーシングログ(図 5.3.6-3)を作成し、このケーシングログに従い、止水パッカーを設置した。止水パッカーの設置深度を表 5.3.6-3 に示す。

止水パッカー上端深度	20.975mabh
止水パッカーゴム上端深度	21.230mabh
止水パッカーゴム下端深度	22.230mabh

表 5.3.6-3 13MI36 号孔の止水パッカー設置深度



図 5.3.6-3 13MI36 号孔ケーシングログ

止水パッカーの圧力は、湧水導水用配管のバルブ開放時で 2.8MPa になるように調整した。設置後から、パッカー拡張チューブ切り離しまでのパッカー圧の推移を図 5.3.6-4 に示す。

止水パッカーによる止水効果を確認するため、止水パッカー拡張前、拡張後およびロッド回収後に 孔口湧水量測定を実施した。表 5.3.6-4 に示す結果の通り、パッカー拡張後の湧水量はパッカー拡張 前に比べ約 24L/min 減少している。13MI36 号孔掘削時に実施された孔口湧水量測定の結果、孔底部の 22.05~22.55mabh 区間からの湧水量は 22.86L/min であり、ほぼ同程度の湧水量が減少したことで、 十分に止水ができていると判断した。その後、パッカー圧調整期間を経て、パッカー挿入ロッド類を 止水パッカーから切り離し、引上げ回収して作業を終了した。



図 5.3.6-4 13MI36 号孔止水パッカー圧の推移

	パッカー	- 拡張前	パッカー	一拡張後	ロッド回収後			
通水县测会	(8/20	13:56)	(8/20	14:38)	(8/25 10:58)			
伤小 重侧止	時間	中日(1)	時間		時間	一日(1)		
	(sec)	谷童(L)	(sec)	谷童(L)	(sec)	浴量(L)		
1回目	17.55	13.00	41.60	13.00	47.36	13.00		
2回目	18.35	13.00	41.38	13.00	47.45	13.00		
3回目	18.81	13.00	41.24	13.00	48.00	13.00		
4回目	18.33	13.00	41.83	13.00	-	_		
5 回目	18.44	13.00	41.41	13.00	-	_		
平均	18.30	13.00	41.49	13.00	47.60	13.00		
湧水量(L/min)	42	. 6	18		16.4			

表 5.3.6-4 13MI36 号孔の孔口湧水量測定結果

止水パッカーを指定の深度に設置するため、ケーシングログ(図 5.3.6-5)を作成し、このケーシングログに従い、止水パッカーを設置した。止水パッカーの設置深度を表 5.3.6-5 に示す。

表 5.3.6-5 13MI37 号孔の止水パッカー設置深度

止水パッカー上端深度	25.440mabh
止水パッカーゴム上端深度	25.695mabh
止水パッカーゴム下端深度	26.695mabh



図 5.3.6-5 13MI37 号孔ケーシングログ

止水パッカーの圧力は、湧水導水用配管のバルブ開放時で 2.9MPa になるように調整した。設置後から、パッカー拡張チューブ切り離しまでのパッカー圧の推移を図 5.3.6-6 に示す。

止水パッカーによる止水効果を確認するため、止水パッカー拡張後およびロッド回収後に孔口湧水 量測定を実施した。本孔からは毎分 200L 以上の湧水があるため、孔外への排水時間をできるだけ短く する必要があった。そのため、止水パッカーの挿入後すぐに拡張しており、止水パッカー拡張前の湧 水量測定は実施していない。ただし、モニタリング装置引き抜き後に孔口湧水量の計測が測定されて おり、その時の湧水量は 206L/min であった。表 5.3.6-6 に示す結果の通り、パッカー拡張後の湧水量 は約 21L/min であり、パッカー拡張前に比べ約 190L/min 減少している。13MI37 号孔掘削時に実施さ れた孔口湧水量測定の結果、孔底部の 26.00~27.00mabh 区間からの湧水量は 177.78L/min であり、ボ ーリング孔底からの湧水を止水できていると判断した。その後、パッカー圧調整期間を経て、パッカ ー挿入ロッド類を止水パッカーから切り離し、引上げ回収して作業を終了した。



図 5.3.6-6 13MI37 号孔止水パッカー圧の推移

	パッカー	一挿入前	パッカ・	一拡張後	ロッド回収後				
湧水量測定	(10	/14)	(10/15	10:38)	(10/21 11:05)				
	容量(L)	時間 (sec)	容量(L)	時間 (sec)	容量(L)	時間 (sec)			
1回目	_	_	1.83	5.00	13.00	35.37			
2回目	_	_	1.82	5.00	13.00	35.86			
3回目	_	_	1.86	5.00	13.00	36.44			
平均	_	_	1.84	5.00	13.00	35.89			
湧水量(L/min)	2	10	22	2.0	21.7				

表 5.3.6-6 13MI37 号孔の孔口湧水量測定結果

5.3.7 間隙水圧のモニタリング装置の設置

これまで実施した調査の結果を基に、12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔、13MI37 号孔および 14MI49 号孔においてモニタリング装置の設置を行った。設置状況の写真を図5.3.7-1 および図5.3.7-2 に示す。再設置及び設置した間隙水圧モニタリング装置の構成概念図を図 5.3.7-3~図 5.3.7-7 に、 設置状況を図 5.3.7-8 に示す。なお、概念図に示す深度はボーリング孔口を基準とした。



図 5.3.7-1 設置前の間隙水圧モニタリング装 置孔内部



図 5.3.7-2 間隙水圧モニタリング装置の設置 状況



図 5.3.7-3 12MI30 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図



図 5.3.7-4 12MI31 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図



図 5.3.7-5 13MI36 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図



図 5.3.7-6 13MI37 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図



図 5.3.7-7 14MI49 号孔間隙水圧モニタリング装置の再設置孔内部構成図



図 5.3.7-8 間隙水圧モニタリング装置の設置状況

5.3.8 間隙水圧モニタリング結果

間隙水圧モニタリング結果を図 5.3.8-1~図 5.3.8-6 に示す。また、平成 26 年 1 月 31 日(比較的水圧が安定していると考える時期)の1日平均(測定インターバル 5 分)を表 5.3.8-1 に示す。

間隙水圧モニタリングの結果、15mabh 以深については 1.57~1.59MPa で比較的安定していることを 確認した。

表 5.3.8-1	水圧安定時の	間隙水圧モニタ	リング結果	(平成 26 年 1	月 31 日)
-----------	--------	---------	-------	------------	---------

	_12MI30																							
		int1			int2			int3			int4			int5			int6			int7				
測定区間 (mabh)	25.3	~	25.9	24.2	~	24.5	22.0	~	23.8	20.2	~	20.8	11.4	~	19.0	9.5	~	10.2	4.9	~	8.4			
区間圧力(MPa)		—			1.59			1.59			1.58			1.57			1.38		0.14					
	12MI	31		-																				
		int1			int2			int3			int4			int5			int6			int7			int8	
測定区間 (mabh)	23.3	~	26.0	22.6	~	22.9	20.4	~	22.2	18.1	~	19.2	16.3	~	16.9	14.1	~	15.1	7.8	~	12.9	5.0	~	6.6
区間圧力(MPa)		1.58			1.59			1.58			1.58			1.58			1.56			1.58			0.69	
	13MI3	36																						
		int1			int2			int3			int4		int5			int6				int7				
測定区間 (mabh)	19.8	~	21.2	18.0	~	18.6	15.6	~	16.8	14.9	~	15.2	13.8	~	14.4	8.0	~	12.6	3.2	~	6.8			
区間圧力(MPa)		1.59			1.59			1.58			1.58			1.58			1.59			0.73				
	13MI3	37																						
		int1			int2			int3			int4			int5			int6			int7			int8	
測定区間 (mabh)	24.6	~	25.5	22.8	~	23.4	20.5	~	21.6	18.5	~	19.3	17.8	~	18.1	12.7	~	17.4	6.9	~	11.5	2.6	~	5.7
区間圧力(MPa)		1.59			1.59			1.59			1.58			1.57			1.54			1.57			0.13	
	14MI4	19																						
		int1			int2			int3		int4			int5		int6									
測定区間 (mabh)	19.1	~	25.9	17.3	~	17.9	15.4	~	16.1	14.7	~	15.0	9.7	~	14.3	4.3	~	8.5						
区間圧力(MPa)		1.59			1.57			1.57			1.57 1.4		1.46		1.06									



図 5.3.8-1 間隙水圧モニタリング結果(全孔)



図 5.3.8-2 間隙水圧モニタリング結果(12MI30 号孔)



図 5.3.8-3 間隙水圧モニタリング結果(12MI31 号孔)



図 5.3.8-4 間隙水圧モニタリング結果(13MI36 号孔)



図 5.3.8-5 間隙水圧モニタリング結果(13MI37 号孔)



図 5.3.8-6 間隙水圧モニタリング結果(14MI49 号孔)

5.4 まとめ

岩盤中の物質移行特性評価技術の高度化調査の実施検討として、国内の地質環境を対象としたトレ ーサー試験装置等の適用性を検討する場の地質環境特性の把握が求められている。JAEA が研究調査を 実施している瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑(換気立坑)において、トレーサー試験 装置等の実施に適した割れ目を検出することを目的として、2本のボーリング孔の掘削作業と掘削し たボーリング孔を用いた各種検層、透水試験、ポイント希釈試験、間隙水圧モニタリング装置の設置 および、モニタリングを行った。以下にボーリング孔掘削、地質学的調査、水理学的調査、ポイント 希釈試験の観点から、本作業のまとめおよび、今後の課題と展望について述べる。

5.4.1 地質学的調查(14MI49号孔)

地質学的調査について以下にまとめる。また、総合地質柱状図を図 5.4.1-1 に示す。

- ・ コアの採取および記載を14MI49号孔の掘削した全深度について実施した。
- 採取したコアは、孔口付近のコンクリートを除き、全て中粒黒雲母花崗岩(土岐花崗岩)
 より構成される。
- ・ この中粒黒雲母花崗岩は弱い変質といくつかの時期の異なる変形作用を被っている。
- 花崗岩は石英、長石類および黒雲母を主体として構成され、まれに角閃石が認められる。
- ・ 全体的な変質の特徴としては、母岩全体に長石が白濁化する弱い変質を受け、断層や一部の割れ目の集中する区間には、長石のセリサイト化、粘土化、緑泥石および、黄鉄鉱、方解石、霰石の形成が認められる。
- 割れ目充填鉱物は、緑泥石、方解石を主体とし、粘土、黄鉄鉱、霰石が認められる。
- 断層岩は、カタクラサイトおよび断層ガウジ、断層角礫が認められる。
- 岩盤等級は、A級2m、B級9m、CH級10m、CM級1m、CL級1mである。
- ・ RQDは、割れ目の少ない区間では80~99%、割れ目の発達する区間では40~72%を示す。
- ・ 割れ目の密度は、孔全体で 5.00 本/m である。表 5.4.1-1 に深度別に見た割れ目密度とその成因を示す。

深度	割れ目 密度	割れ目成因別密度(本/m)						
(mabh)	(本/ m)	剪断	引張	機械割れ	剪断 または 引張	引張 または 機械割れ		
0~1	15	6	3	3	1	2		
1 ~ 2	6	4	0	0	2	0		
2~3	5	0	2	1	1	1		
3~4	13	0	2	5	4	0		
4~5	9	4	0	1	3	0		
5~6	7	1	3	3	0	0		
6~7	15	0	1	2	2	1		
7~8	10	8	0	1	1	0		
8~9	6	2	2	0	2	0		
9~10	6	1	0	1	3	1		
10 ~ 11	2	0	0	1	1	0		
11 ~ 12	2	0	1	1	0	0		
12 ~ 13	1	0	0	1	0	0		
13 ~ 14	6	6	0	0	0	0		
14 ~ 15	6	1	0	0	5	0		
15 ~ 16	4	0	1	0	3	0		
16 ~ 17	5	2	1	0	2	0		
17 ~ 18	4	0	0	1	3	0		
18 ~ 19	6	1	0	0	5	0		
19 ~ 20	3	0	1	1	1	0		
20 ~ 21	4	0	2	0	1	1		
21 ~ 22	4	0	3	1	0	0		
22 ~ 23	6	4	0	0	1	1		

表 5.4.1-1 深度別に見た割れ目密度とその成因



図 5.4.1-1 14MI49 号孔の総合土質柱状図

5.4.2 水理学的調查(13MI37号孔、14MI49号孔)

水理学的調査について以下にまとめる。

<13MI37 号孔>

フローメータ検層を実施した結果、検層結果から流量変化が見られた深度は 17.8~17.9mabh (1.2L/min)、20.3~20.4mabh(7.1L/min)、20.7~20.9mabh(2.5L/min)、21.0~21.1mabh(3.0L/min)、 21.2~21.3mabh(1.2L/min)、22.5~23.1mabh(1.4L/min)、23.1~23.2mabh(2.4L/min)の7深度 において流量の変化が確認された。

単孔透水試験の対象とする割れ目は、掘削時の湧水量変化、コア観察、ボアホールカメラの画像、 フローメータ検層等の結果を基に抽出した。

湧水割れ目を特定する単孔式の透水試験は、12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔との連結性が
期待される深度 23mabh、22mabh、21mabh、20mabh、19mabh、18mabh 付近の割れ目を対象に実施した。
深度 23mabh 付近では、割れ目番号 2-22、2-23 を対象として 4.0L/min の湧水量があり、断層角礫
岩をカバーする深度 22.80~23.47mabh を選定した。深度 22mabh 付近では、割れ目番号 2-14~2-18、
2'-1 を対象として 5.5L/min の湧水量がある深度 21.20~21.87mabh を選定した。深度 21mabh 付近では、割れ目番号 2-6~12 を対象として 11.1L/min の湧水量がある深度 20.50~21.17mabh を選定した。
深度 20mabh 付近では、割れ目番号 1-39、2-1~2-5 を対象として 15.0L/min の湧水量がある深度 19.90
~20.57mabh を選定した。深度 19mabh 付近では、割れ目番号 1-34~1-35 を対象として 2.0L/min の湧水量がある深度 18.70~19.37mabh を選定した。
深度 18mabh 付近では、割れ目番号 1-30~1-33、1'-2
を対象として 1.05L/min の湧水量がある深度 17.70~18.37mabh を選定した。

これら単孔式透水試験で選定した区間を対象に、孔間式透水試験を実施した(表 5.4.2-1)。

- ・ 試験番号 No.1 (22.87~23.47mabh) における孔間透水試験では、12MI30 号孔 Int1,2 と
 12MI31 号孔 Int1 で 20.035~0.061mH₂0 程度の圧力応答が起きている。
- ・ 試験番号 No. 2(21.20~21.87mabh)における孔間透水試験は、12MI30 号孔 Int4 で特に大きく、0.035mH₂0 程度の圧力応答が起きている。
- ・ 試験番号 No.3 (20.50~21.17mabh) における孔間透水試験は、12MI30 号孔 Int4 で特に大きく、0.107mH₂0 程度の圧力応答が起きている。
- 試験番号 No.4(19.90~20.57mabh)における孔間透水試験は、12MI30 号孔 Int4 で特に大きく、0.097mH₂0 程度の圧力応答が起きている。
- ・ 試験番号 No.5(18.70~19.37mabh)における孔間透水試験は、12MI30 号孔 Int4 と 12MI31
 号孔 Int3 で 0.010~0.014mH₂0 程度の圧力応答が起きている。
- 試験番号 No.6(17.70~18.37mabh)における孔間透水試験では、12MI31 号孔の Int3,4,6
 で 0.014~0.018mH₂0 程度の圧力応答が起きている。

試験番号	試験深度		封除士法	网长注	透水量係数	时 网 / 《 粉	初期間隙水圧	揚水量	区間湧水量
	上端(mabh)	下端(mabh)	武颢万法	胜们 运	(m2/sec)	灯笛休奴	Мра	(L/min)	(L/min)
No.1 20	22.80	23.47	-	Jacob	1.58E-05	-	1.5027	0.80	4.00
110.1	110.1 22.00			Agarwal	1.39E-05	-			
No 2	N- 0 01.00	01.07		Jacob	2.47E-05	-	1 / 007	0.72	5 50
NO.2 21.20	21.07		Agarwal	3.08E-05	-	1.4007	0.75	5.50	
No 2	No.3 20.50	21.17	定流量 揚水試験	Jacob	8.36E-06	-	1.4907	2.00	11.10
110.5				Agarwal	1.77E-05	-			
No.4	No.4 19.90	20.57		Jacob	1.26E-05	-	1.4927	2.10	15.00
N0.4				Agarwal	2.30E-05	-			
No.5 18.70	10.70	19.37		Jacob	1.02E-05	-	1.4937	0.48	2.00
	16.70			Agarwal	8.55E-06	-			
No.6	17.70	18.37		Jacob	1.06E-06	_	1.4757	0.24	1.05
				Agarwal	3.30E-06	_			

表 5.4.2-1 13MI37 号孔孔間透水試験結果一覧表

※透水量係数の太文字の値を代表値とした。

<14MI49 号孔>

フローメータ検層を実施した結果、検層結果から流量変化が見られた深度は 14.4~14.6mabh (1.5L/min)、14.7~15.1mabh(3.0L/min)、15.4~15.9mabh(1.8L/min)の3深度において流量の 変化が確認された。

単孔透水試験の対象とする割れ目は、掘削時の湧水量変化、コア観察、ボアホールカメラの画像、 フローメータ検層等の結果を基に抽出した。

湧水割れ目を特定する単孔式の透水試験は、12MI30 号孔、12MI31 号孔、13MI36 号孔との連結性が 期待される深度 18.5mabh 以深、16mabh、15.5mabh、15mabh、14.5mabh 付近の割れ目を対象に実施した。

深度 18.5mabh 以深では、割れ目番号 1-30~1-34、2-1~2-14 を対象として 10.90L/min の湧水量が ある深度 18.5~22.47mabh を選定した。深度 16mabh 付近では、割れ目番号 1-19~1-21 を対象として 1.40L/min の湧水量がある深度 16.30~16.97mabh を選定した。深度 15.5mabh 付近では、割れ目番号 1-14~1-16 を対象として 3.30L/min の湧水量がある深度 15.05~15.72mabh を選定した。深度 15mabh 以深では、割れ目番号 1-10~1-13 を対象として 3.60L/min の湧水量がある深度 14.80~15.47mabh を 選定した。深度 14.5mabh 付近では、割れ目番号 1-8を対象として 1.00L/min の湧水量がある深度 14.00 ~14.67mabh を選定した。

これら単孔式透水試験で選定した区間を対象に、孔間式透水試験を実施した(表 5.4.2-2)。

- ・ 試験番号 No.1(18.50~22.47mabh)における孔間手透水試験では、12MI30 号孔 Int2,3、
 12MI31 号孔 Int2、13MI37 号孔 Int1 で 0.010mH₂0 程度の圧力応答が起きている。
- ・ 試験番号 No. 2(16.30~16.97mabh)における孔間透水試験では、12MI31 号孔 Int4,5 で特に大きく、0.028~0.035mH₂0 程度の圧力応答が起きている。

- 5-213 -

- 試験番号 No.3 (15.05~15.72mabh) における孔間透水試験では、12MI31 号孔 Int4,5 で特に大きく、0.025~0.030mH₂0 程度の圧力応答が起きている。
- 試験番号 No.4(14.80~15.47mabh)における孔間透水試験では、12MI31 号孔 Int5 で特に 大きく、0.068mH₂0 程度の圧力応答が起きている。
- 試験番号 No. 5(14.00~14.67mabh)における孔間透水試験では、12MI31 号孔 Int4,5 で 0.012
 ~0.020mH₂0 程度の圧力応答が起きている。
- 試験番号 No. 6(17.25~17.87mabh)における孔間透水試験では、12MI31 号孔 Int4 と 13MI36
 号孔 Int3 に僅かながら圧力応答が見られた。

試験番号	試験深度		封除七法	宏长注	透水量係数	睑网体粉	初期間隙水圧	揚水量	区間湧水量
	上端(mabh)	下端(mabh)	武颢力法	胜们 法	(m2/sec)	灯由休奴	Мра	(L/min)	(L/min)
N - 1	10.50	00.47		Jacob	5.45E-05	-	1 4057	2.00	10.00
INO. I	No.1 18.50	22.47	定流量 揚水試験	Agarwal	3.63E-05	-	1.4957	2.00	10.90
N - 0	N 0 10.00	16.97		Jacob	2.94E-06	-	1.4526	0.30	1.41
NO.2 10.30	10.30			Agarwal	2.87E-06	-			
N 0 15.05	15.05	15.72		Jacob	8.49E-06	-	1.4847	0.67	3.29
INO.3	No.3 15.05			Agarwal	9.77E-06	-			
No.4 14.80	15.47		Jacob	1.52E-05	-	1.4807	0.60	3.58	
			Agarwal	7.63E-06	-				
N- E 14.00	14.00	1467	1	Jacob	1.82E-05	-	1.4847	0.25	1.04
100.0	14.00	14.07		Agarwal	6.01E-06	-			
No.6	17.27	17.87	非定常 試験	Hvorslev	5.38E-08		1.5711		0.0025

表 5.4.2-2 14MI49 号孔孔間透水試験結果一覧表

※透水量係数の太文字を代表値とした。

5.4.3 ポイント希釈試験(13MI37 号孔、14MI49 号孔)

ポイント希釈試験結果について以下にまとめる。

- 13MI37 号孔および、14MI49 号孔において、ウラニンをトレーサーとしたポイント希釈試験 を実施した。両孔ともに間隙水圧モニタリング装置の区間を用いて、13MI37 号孔では4区間、 14MI49 号孔では3区間を試験対象とした。
- ・ 昨年度(H25年度)での調査結果から、蛍光セル2台(C1,C2)を用いたウラニン濃度計測 は 3mg/L 以下での使用が望ましいことが判明していたため、本調査では 3mg/L を初期濃度と したポイント希釈試験を実施した。
- ・ ウラニン濃度希釈過程を追跡したところ、6 区間で蛍光強度は時間経過とともに概ね直線
 的に減少した。1 区間のみ濃度が減少せず横ばいとなり、地下水の流入出がなかったと考えられる。

5.5 今後の課題

これまでの調査の結果で、調査対象地の深度 300m ボーリング立坑では 15mabh 以深から湧水を伴う 割目が徐々に増えることが確認できた。15mabh 以深での透水量係数は10-6~10-5m2/sec が最も多く、 間隙水圧は 1.57~1.59MPa で安定している。ただし、割れ目の水理的な連続性は確認できたが、単一 の割れ目は見つかっていない。

トレーサー試験の原位置での適用性試験は、より良い試験結果を得るために単一の割れ目で実施す ることが望ましい。今後は、比較的割れ目が少ないと想定される深度 500m 地点においても調査対象と して検討していきたい。

参考文献

電力中央研究所(2014): 平成 25 年度地層処分技術調査等(地層処分技術調査等事業:岩盤中物質移 行評価技術確証技術開発―岩盤中物質移行特性評価技術の確証―)報告書、640p.

電力中央研究所(2013): 平成 24 年度地層処分技術調査等(地層処分共通技術調査:岩盤中地下水移 行評価技術高度化開発一岩盤中物質移行特性評価技術高度化調査一)報告書、444p.

鶴田忠彦、武田匡樹、上野孝志、大丸修二、徳安真吾、尾上博則、新宮信也、石橋正祐紀、竹内竜史、

松岡稔幸、水野崇、田上雅彦:「超深地層研究所計画;主立坑断層を対象としたボーリング調査結 果報告書」、JAEA-Technology 2012-001、pp.3、(2012)

- 地盤工学会:第7編 地下水調査、第9章 孔内水位回復法による岩盤の透水試験、地盤調査の方法 と解説、pp423-437、(2004)
- 柳澤孝一・西垣誠・平田洋一:動燃式低水圧制御水理試験機(動燃式 JFT)の原理と適用例、地下水 学会誌 第30巻 第3号、pp127-137、(1988)
- 6. 原位置トレーサー試験
- 6.1 はじめに

本研究においては、平成17年度より収着性トレーサーの使用も可能な原位置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、単孔式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った。

今年度は、5章で述べた日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑 において、改良した試験装置の我が国の地質環境に対する原位置適用性試験に着手した。

6.2 トレーサー試験装置概要

6.2.1 トレーサー試験装置の構成

トレーサー試験装置は孔内装置と孔外装置に大分され、さらに注入装置部・揚水装置部・制御装置 部に分けられる。トレーサー試験装置の構成図を図 6.2.1-1 に示す。各種試験に応じて孔外部の配管 や孔内部の配管を入れ替えることで、試験孔を注水側、揚水側に変更することが可能である。



図 6.2.1-1 トレーサー試験装置構成図

6.2.2 孔内装置概要

トレーサー試験装置の孔内装置には、通常、注水孔・揚水孔に同一構造のものを使用するが、12MI30 号孔は孔底に湧水防止用のパッカーを設置しており、通常のパッカー部(孔内装置)では、試験対象 深度に設置できないことが判明した。よって、急遽、パッカー部先端の圧力計ハウジングを外し、代 わりにエンドキャップを取り付ける構造に変更した。この構造変更に伴い試験区間内の圧力を計測す る圧力計(P2)をパッカー部の先端に有るライン結合プローブ内へ収納した。

孔内装置は孔口パッカー、中継部(ロッド)およびパッカー部から構成される。図 6.2.2-1 に孔内 装置部の構成を示す。また、12MI31 号孔用(通常装置)と 12MI30 号孔用の構造変更を赤丸で示した。



図 6.2.2-1 左図:通常型のパッカー部、右図:改良型のパッカー部

孔ロパッカーは、孔口を閉塞し孔口からの地下水の流出および間隙水圧環境の擾乱を防止する。孔 ロパッカーはパッカー1本からなり、長さは1.00m、最大外径はφ79mmである。

中継部(ロッド)は測定部、孔口パッカーを設置撤去するための保護部品であり、

外形 6mm 電力信号線×1 本

外形 6mm 光ファイバ線×1本

外形 6mm トレーサー注入用配管×4本

外形 6mm P1、 P3 水圧配管×2 本

外形 4mm 六方バルブ駆動用配管×2本

外形 4mm パッカー拡張配管×2本

の計 12本の配線と配管を内部に収納する。長さは 3.00、2.00、1.00、0.50mの各種を組み合わせて使用した。

パッカー部は試験区間を構築し、トレーサー注入ポート・揚水ポートを内蔵するとともに、各種センサーを収納し、各種データの検知部の機能を併せ持っている。長さは 12MI30 孔用で 2.405m、12MI31 号孔用で2.84m、最大外径は φ 79mm であり、そのうちパッカーには試験区間長 20cmの透水部を設けた。

6.3 単孔・孔間トレーサー試験の概要

日本国内におけるトレーサー試験装置の適用性試験として、12MI30 号孔、12MI31 号孔の2 孔を対象 に単孔式トレーサー試験としてポイント希釈試験と単孔式注水揚水試験を、孔間トレーサー試験とし てダイポール試験を実施した。試験装置は、(一財)電力中央研究所が開発したトレーサー試験装置を 用いた。

トレーサー試験の準備として、試験ごとに以下の項目を実施した。

- トレーサー試験装置の機材は室内で正常に作動することを確認してから瑞浪の現場へ搬入した。
- トレーサー材として保存性の重水(D₂0)、蛍光染料(ウラニン、アミノG酸)と収着性のイオン
 (Rb⁺、Ba²⁺、K⁺)を用い、注水する用水は原位置で採水した地下水を用いた。
- トレーサー材の組み合わせや濃度、注水・揚水流量や作業時間は、試験ごとに決定した。
- ・ 蛍光染料のウラニンに対しては、蛍光センサーのキャリブレーションを実施し、蛍光センサーごとに検量線を作成した。

各試験の概要については以下に示す。

6.3.1 ポイント希釈試験

6.3.1.1 ポイント希釈試験の概要

ポイント希釈試験はトレーサー試験装置のピストンパッカーを用いて形成した試験区間内にトレー サーを循環させ、試験区間内を通過する自然の流れによりトレーサーが希釈される速度を計測する試 験である。この試験より得られたトレーサー濃度の希釈速度から試験区間を通過した自然流速 v を求 めることができる。

6.3.1.2 ポイント希釈試験の試験手順

ポイント希釈試験は、図 6.3.1-1 に示す①~④の手順に従い実施した。なお、試験はトレーサー溶 液が十分に希釈されるまで継続した。

- ① 孔内装置および地上配管のエアー抜きを行い、トレーサー置換タンクにトレーサーを、地下水 タンクに地下水を充填する。
- ② 無脈動ポンプ(MP)を用いて、試験区間と地上部配管内の地下水を一定の流量で循環させる。 また、同時にMPと同じ流量でプランジャーポンプ(PP)を始動しトレーサーを試験区間直上の六 方バルブ(V6)まで置換する。
- ③ 配管内の流速が安定し、C1 蛍光センサーの値からトレーサー濃度が一定になったことを確認で きた時点で、トレーサーが試験区間へ流れるように V6 バルブを切り替え、トレーサータンク内の

トレーサー溶液を試験区間の地下水と置換する。

④ 蛍光センサーの値が各々一定になることを確認した時点で、希釈試験を開始するためにトレーサー置換タンクの V3-1、V3-2 バルブを循環側に切り替える。その後、トレーサー濃度が自然の地下水の流速で希釈される過程を C2 蛍光センサーにより計測する。









※ 全ての配管は地下水ないしトレーサー溶液で満たされているが、視覚的な見やすさを優先し、循環 に関係がない一部の配管を --- で表示した。

※ 上図はトレーサー循環流量を 100mL/min とした場合のもの

図 6.3.1-1 ポイント希釈試験の試験手順概念図

6.3.2 単孔式注水揚水試験

単孔式注水揚水試験は、トレーサーの注入と回収を同一孔同一区間で実施する試験である。

6.3.2.1 単孔式注水揚水試験の概要

単孔式注水揚水試験は、同一孔でトレーサーの注入、回収を行う試験である。1本のボーリング孔 で全ての手順を行うため、1回当たりの試験コストを低く抑えることができ、複数地点、複数深度で 試験を行うことによってデータ拡充が期待できる試験法である。

単孔式注水揚水試験の概念図と単孔式トレーサー試験で得られる破過曲線の概念図を図 6.3.2-1 に 示す。また、試験の手順を以下に示す。

② 水を注入孔から定流量(あるいは定圧)で注入し、定常状態を形成する。

- ② 一種類、あるいは複数種類のトレーサー注入に切り替える。
- ③ トレーサー注入終了後、チェーサーの注入を行う。
- ④ チェーサー注入終了後、一定時間静置する。
- ⑤ 注入ラインを揚水ラインに切り替え、定流量(あるいは定圧)で揚水し、トレーサーの回収 を行う

③、④は試験によっては省かれることもあり、トレーサー注入終了後すぐに揚水を開始する場合も ある。但し、チェーサー(主に原位置でサンプリングされた水が使用される)を注入することによっ て、トレーサーが広範囲に浸透するため、より広範囲の物質移行を評価することが可能となると考え られる。また、注入ライン(揚水ライン)や試験区間内を水でフラッシングすることによって、試験 装置内や試験区間内にトレーサーが残留することを防ぐ。また、チェーサー注入後に待機時間を設け ることによって、吸着や岩石基質への拡散に必要な時間を設けることも期待できる。



図 6.3.2-1 単孔式トレーサー試験における試験孔のトレーサー濃度変化の模式説明図

6.3.2.2 単孔式注水揚水試験の試験手順

単孔式注水揚水試験は図 6.3.2-2 の①~⑦の手順に従い実施した。なお、試験は回収したトレーサ 一溶液の濃度が十分に低下するまで継続した。

- ① 孔内装置および地上配管のエアー抜きを行い、トレーサー置換タンクにトレーサーを、地下 水タンクに地下水を充填する。
- ② 試験区間からの湧水を湧水圧によって自然に置換タンクに流入させることによって、置換タンク内のトレーサーを配管内に充填する。C1 蛍光センサーの値を確認し、配管内のトレーサー 濃度が一定になるまで置換する。
- ③ 定常流速場を形成するため、MP ポンプを用いて地下水を一定流量で注水する。
- ④ 六方バルブ(V6)をトレーサー注水側に切り替え、トレーサーを試験区間内に注入する。C2
 蛍光センサーの値を確認し、トレーサーが注入されていることを確認する。また、トレーサー
 注入から停止までの置換タンクの水位を求め、トレーサーの注水量を把握する。
- ⑤ 所定の時間トレーサーを注入したら、V6 バルブを地下水注水側に切り替えチェーサー(地下水)を試験区間内に注入する。C2 蛍光センサーの値を確認しチェーサーが注入されていることを確認する。
- ⑥ 所定の時間チェーサーを注入したら、MP ポンプを停止する。
- ⑦ 所定の時間待機した後に、MP ポンプを逆転して試験区間から揚水する。トレーサー回収期間 中は、原則として、フラクションコレクターによりトレーサーを一定時間毎にサンプリングす る。また、フラクションコレクターでサンプリングされずに分岐して排水されるトレーサーは、 回収タンクで回収する。ある時間における回収率は、回収タンクで回収されたトレーサーをよ くかき混ぜてサンプリングし、その試料を分析することによって求める。









※ 全ての配管は地下水ないしトレーサー溶液に満たされているが、視覚的な見やすさを優先し、循環に関係がない一部の配管を --- で表示した。

図 6.3.2-2 単孔式注水揚水試験の試験手順概念図



C1

6.3.3 ダイポール試験

ダイポール試験は、2孔のボーリング孔に形成した試験区間を対象に、一方のボーリング孔からトレーサーを注入し、もう一方から回収して行う試験である。

6.3.3.1 ダイポール試験の概要

ダイポール試験は、1 孔から水を注入し、もう1 孔で地下水を揚水し、流れが定常状態に達した後、 注入孔からトレーサーを注入し、揚水孔からトレーサーを回収する試験形態である(図 6.3.3-1 参照)。 試験方法は、揚水した水を循環する(再度注入する)方法あるいは循環しない方法、注入量と揚水量 を等しくする方法あるいは注入量を揚水量よりも小さくする方法などに細分される。

ダイポール試験は主として2孔間の岩盤・地盤の物質移行特性を評価するのに用いられる。放射状のトレーサー試験に比べると孔間の地下水流速を大きく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・岩盤や孔間距離が大きい場合でも比較的トレーサーが観測しやすい試験方法である。



図 6.3.3-1 ダイポール試験の概念図

6.3.3.2 ダイポール試験の試験手順

ダイポール試験は図 6.3.3-2 の①~⑤手順に従い実施される試験である。なお、試験は回収したトレーサー溶液の濃度が十分に低下するまで継続した。

- ① 孔内装置および地上配管のエアー抜きを行い、トレーサー置換タンクにトレーサーを地下水 タンクに地下水を充填する。揚水孔側の地下水タンクはエアー抜きが終了した時点で、空の状 態とする。
- ② 試験区間からの湧水を湧水圧によって自然に置換タンクに流入させることによって、置換タンク内のトレーサーを配管内に充填する。C1 蛍光センサーの値を確認し、配管内のトレーサー 濃度が一定になるまで置換する。
- ③ 定常流速場を形成するため、揚水側の無脈動ポンプ(MP-1)と注水側の無脈動ポンプ(MP-2)を 用いて地下水を一定流量で循環させる。
- ④ 六方バルブ(V6-1)をトレーサー注水側に切り替え、トレーサーを試験区間内に注入する。
 C2-1 蛍光センサーの値からトレーサーが注入されていることを確認する。また、トレーサー注
 入から停止までの置換タンクの水位を求め、トレーサーの注水量を把握する。揚水側では、C2-2
 蛍光センサーの値からトレーサーが揚水されているかを確認する。揚水した地下水はフラクションコレクターにより一定時間ごとにサンプリングする。
- ⑤ 所定の時間トレーサーを注入したら、V6(六方バルブ)を地下水注水側に切り替え、チェー サー(地下水)を試験区間内に注入する。C2-1 蛍光センサーの値を確認し、チェーサーが注入さ れていることを確認する。④と同様に揚水側では、C2-2 蛍光センサーの値からトレーサーが揚 水されているかを確認する。揚水した地下水はフラクションコレクターにより一定時間ごとに サンプリングする。





.





※ 全ての配管は地下水ないしトレーサー溶液に満たされているが、視覚的な見やすさを優先し、循環に関係がない一部の配管を --- で示した。

図 6.3.3-2 ダイポール試験の試験手順

6.4 トレーサー試験の原位置適用性試験

6.4.1 適用性試験場の概要

原位置適用性試験場は、5章で述べた日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑である。今回の適用性試験では、同横坑に掘削した 12MI30 号孔と 12MI31 号孔の 2本の ボーリング孔を使用した。試験対象となるボーリング孔の配置図を図 6.4.1-1 に示す。

12MI30 号孔は、24.46~24.66mabh が試験区間になるようピストンパッカー部に透水帯となるメッシュ部の深度を合わせて試験装置を設置した。また、同様に 12MI31 号孔は、24.04~24.24mabh が試験 区間になるよう試験装置を設置した。ともに試験区間幅は 20cm とした。孔内試験装置の配置図を図 6.4.1-2 に示す。



図 6.4.1-1 試験対象となる試験孔(12MI30、12MI31)の配置図



図 6.4.1-2 孔内試験装置配置図

6.4.2 適用性試験での確認項目

トレーサー試験装置の適用性試験を平成 20 年度から平成 22 年度で3回、スイス国内の GTS サイト において実施した。今年度は、国内サイトとして JAEA 瑞浪の超深地層研究所の深度 300m ボーリング 横坑で、トレーサー試験の原位置適用性試験を実施する。

今回の適用性試験は、平成22年度以降に装置の高度化および国内サイト用の改良がなされた試験装置のうち、主に以下の①~④の項目を対象に実施した。なお、5MPa対応蛍光センサー、ピストン式トレーサー置換タンクについては昨年度実施したポイント希釈試験で使用し適用性を確認した。

- ① 5MPa 対応高精度圧力計(表 6.4.2-1)
- ② 試験区間形成用パッカーおよびメッシュの性能((図 6.4.2-2、図 6.4.2-1)
- ③ トレーサー注入切換え用六方バルブ(図 6.4.2-3)
- ④ 高出力光源装置(図 6.4.3-2)

外観	
レンジ	5MPa
精度	0.020%F.S. (0.001MPa)
分解能	10mg/L(0.00001MPa)
耐圧	150%F. S.
補償温度	15~45°C
更新速度	50 回/秒
接続	RS-232 or RS-485
最大接続距離	4000feet (RS-485)
ケースサイズ	直径 4.45 cm×高さ 15.24cm
フィッティング	1/4 インチ NPT メネジ
電源	6-20VDC, 45mA@12VDC

表 6.4.2-1 Mensor 社製 CPT6000 の主な仕様



図 6.4.2-1 試験区間形成メッシュ部





図 6.4.2-2 ピストンパッカー 上:形状写真 下:構造図



図 6.4.2-3 トレーサー注入切換え用六方バルブ設計図

6.4.3 試験準備

6.4.3.1 蛍光センサーのキャリブレーション

本試験ではトレーサー濃度の経時変化をリアルタイムで計測できるよう蛍光トレーサーであるフル オレセインナトリウム(ウラニン)を使用した。また、次年度以降のトレーサーの選択肢を広げるた めにアミノG酸も使用した。

ウラニンの蛍光は、地下水の pH に依存するため、調査孔の近傍からの湧水をベースにトレーサー溶 液を作成した。この溶液を用いて、蛍光センサーの蛍光強度(counts)からウラニンの濃度を求める検 量線を得るためのウラニン濃度と蛍光強度のキャリブレーションを実施した。また、トレーサー溶液 の作成時に発生する溶存ガスの析出による気泡が蛍光強度に影響する可能性があるため、キャリブレ ーション時は試験区間とほぼ同じ 1.5MPa に加圧した状態で実施した。ただし、Ver1.0の蛍光センサ ーは、耐圧性能が 1.0MPa のため、このセンサーに関しては大気圧解放状態で実施した。

(1) 蛍光濃度センサー

蛍光濃度センサーは蛍光センサー(Ver. 3.0)、高出力 LED 光源と分光器、データロガーとしての PC およびそれらを接続するファイバケーブルからなる。



図 6.4.3-1 蛍光センサー (Ver.3.0)



図 6.4.3-2 高出力タイプ LED 光源



図 6.4.3-3 分光器

LED 光源電源から照射された 470nm 付近のピーク波長が光ファイバを通して蛍光センサー流路中 のウラニン溶液を蛍光させる。

分光器はフローセルから光ファイバを経て伝送された光(蛍光)を分光し、CCD イメージセンサ にて電気信号に変換し、PC でデータを取り込む。CCD 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ことが可能である。

なお、蛍光センサーのバージョン別の特徴についてまとめたものを表 6.4.3-1 に示す。

	1		1
項目	Ver.1	Ver.2	Ver.3
試作年度	平成 18 年度	平成 21 年度	平成 22 年度
特色	・LED 光源を内蔵	 ・コネクタを振動に弱い SMA から ST に変更 ・LED 光源を内蔵しない構造 ・光ファィバ1.5m が付属。 	・耐圧性能向上 ・光ファイバとフローセルが分 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	接液部:SUS304 窓 材:サファイアガラス
サイズ(mm) 流路×幅 ₄ ×幅 _B	48 × 30 × 25	51 × 27 × 27	82 × 26 × 26
流路径(mm)	φ 4 . 83	φ 4. 83	φ4
重量	98 g	290 g(光ファイバ-1.5m 含む)	126 g
光コネクタ	SMA	ST (プラグ)	ST (レセプタクル)
配管コネクタ	1/4in.	1/4in.	ϕ 6mm

表 6.4.3-1 蛍光センサーの主な仕様

(2) キャリブレーション手順

蛍光濃度センサーのキャリブレーションは、基本的に試験に用いるトレーサーより濃い濃度から トレーサーを含まない地下水のバックグラウンドまでを含む7段階以上の濃度の試料で実施した。 また、蛍光強度を大きくとることで濃度の分解能が上がることから、Integral Time(光の強さを計 測する時間)を各々のセンサーに合わせて変えた。

以上を踏まえ、蛍光濃度センサーのキャリブレーションは以下の手順で実施した。

- ① 蛍光濃度センサーを設置する
- ② 複数の異なる濃度のウラニン溶液を作製する
- ③ ウラニン溶液をフローセル中に満たし、1.5 MPa を給圧する
- ④ プランジャーポンプを用いて 100m1/min で溶液を循環させる
- ⑤ 測定用 PC (データロガー) にて波形や光強度など各種データを取得する
- ⑥ Integral Time を変更する
- ⑦ 各濃度のウラニン溶液について、③④を実施する
- ⑧ ウラニン溶液の濃度と各種データの相関を見ることで、各センサーに見合った検量線を作成 する



図 6.4.3-4 作業風景



図 6.4.3-5 作業風景 2

(3) キャリブレーション結果

トレーサー試験装置は、孔内部に Ver.3の蛍光濃度センサーと地上部に Ver1.0の蛍光濃度センサ ーを配置して試験を実施する予定であったが、12MI30 号孔にトレーサー試験装置を設置する際、通 信系のトラブルにより、Ver.3の蛍光濃度センサーが使用できなくなった。このため、孔外部の循 環系に Ver.2の蛍光濃度センサーを配置して試験を実施した。また、水圧のかからない配管におい ては、トレーサー濃度を確認するため地上に Ver.1の蛍光濃度センサーを設置した(図 6.4.3-6)。



図 6.4.3-6 各蛍光センサーの設置位置

今回の試験では Ver.2の蛍光濃度センサーを急遽使用したため、Integral Time の設定が間に合わず、サンプリングタイムから Integral Time を逆算してキャリブレーションを補整した。また、同じトレーサー濃度に対して Ver.3 の蛍光濃度センサーは試験時の出力値とキャリブレーション 時の出力値に差が出たことから、試験時において既知の濃度を測定しているときのセンサー出力 値の比から補正した。

試験装置のトレーサー試験時の蛍光センサーと Integral Time の関係を表 6.4.3-2 に示す。また、 各蛍光濃度センサーに要した検量線結果を図 6.4.3-7~図 6.4.3-10 に示す。

	試驗		1		带米温度	ヤンサー	· C1		常光達度センサー: C2				営光濃度センサー: C3																		
対象孔	試験種目	試験名	バージョン	配置	Integral time	Average	検量線No.	補整係数	バージョン	配置	Integral time	Average	検量線No.	補整係数	バージョン	配置	Integral time	Average	検量線No.	補整係数											
	ポイント希釈試験	D0M1			200	5		2.8		<u> </u>									1												
	単孔式トレーサー試験	SOM1			280	2	2									\															
	単孔式トレーサー試験	SOM2			400	1		14																							
12MI30	単孔式トレーサー試験	SOM3	Vers.2	地上	400		1	1.4	Ver 1	*** =																					
	単孔式トレーサー試験	SOT8							Ver.I	-87	50	5	4																		
	単孔式トレーサー試験	SOT9			560	1		1																							
	単孔式トレーサー試験	S0T10																													
	ポイント希釈試験	D1T2							Vers.3	孔内	50	2	2	0.07																	
12MI31	単孔式トレーサー試験	S1T4					4	1		孔内	700	1	2	1																	
	単孔式トレーサー試験	S1T5	Ver.1	地上	± 50	5			Vers.3																						
	単孔式トレーサー試験	S1T6									1700	1 3	3	1					\searrow												
	単孔式トレーサー試験	\$1T7															1														
	孔間式トレーサー試験	W1T1	-																						1						
	孔間式トレーサー試験	W1T2																													
	孔間式トレーサー試験	W1T3	-								1700	1	400					5 4		1											
12MI31→ 12MI30	孔間式トレーサー試験	W1T4	Vers.2	地上	560	1	1	1	Ver.3	孔内				0.488	Ver.1	地上 50	50		4												
	孔間式トレーサー試験	W1T5	-																												
	孔間式トレーサー試験	W1T6	-								700	1	400	0.712																	
	孔間式トレーサー試験	W1T10												1																	
	孔間式トレーサー試験	W0T7	-																												
12MI30→ 12MI31	孔間式トレーサー試験	W0T8	Vers.3	孔内	均 700	1	2	0.712	Ver.2	地上	560	1	1	1	Ver.1	地上	± 50	5	4	1											
	孔間式トレーサー試験	W 0Т9																													

表 6.4.3-2 各種トレーサー試験と蛍光濃度センサーおよび Integral Time の対応表



図 6.4.3-7 検量線 1: 蛍光センサーVer.1



図 6.4.3-8 検量線 2: 蛍光センサーVer.2



図 6.4.3-9 検量線 3: 蛍光センサーVer.3



図 6.4.3-10 検量線 4: 蛍光センサーVer.3

6.4.3.2 装置の孔内設置

装置の設置は蛍光濃度センサーのキャリブレーションを行った後に実施した。図 6.4.3-11 に装置の 設置手順を記す。作業状況を図 6.4.3-12 に示す。



図 6.4.3-11 装置の設置手順



図 6.4.3-12 トレーサー試験装置の挿入状況

試験装置から伸びるケーブル類は、蛍光濃度センサーなどのケーブル、圧力測定やパッカー拡張な どに用いるチューブの計12本からなり、手順②では作業中の断線や破損を予防するためにこれらケー ブル類を配線保護材で保護した。

手順④では、ポート位置を水平に保つため、図 6.4.3-13 に示す冶具を用いて、水平向きを確認しな がら試験装置を挿入した。



図 6.4.3-13 冶具使用状況

パッカー拡張の圧力源にはコンプレッサーと窒素ガスを併用し、図 6.4.3-14 のパッカー拡張用タン クを用いて水圧でパッカーを拡張した。パッカー拡張用タンクは注水側および揚水側の装置に各 1 本 (計 2 本)使用した。1 孔あたりに設置するピストンパッカーと孔ロパッカーの 2 本のパッカーは 1 本のパッカー拡張用タンクを併用して拡張した。



図 6.4.3-14 パッカー拡張用タンク

パッカー拡張の標準的な手順は以下のとおりとした。

- ① 孔内装置から地上部へのラインを全て開放する。
- ② パッカー拡張用タンクにコンプレッサーから 2.3MPa 給圧する。
- ③ 孔内装置のピストンパッカーを拡張する。拡張時の水量を把握する。
- ④ 孔口パッカーを拡張する。拡張時の水量を把握する。
- ⑤ パッカー拡張用タンクに給圧を窒素ボンベに切り替え 2.6MPa で給圧する。
- ⑥ 孔内から地上部へのラインを閉鎖する。
- ⑦ パッカー拡張用タンクのパッカー加圧ラインを閉鎖する。また、各パッカーは収縮後、確実 にパッカーからの水が戻っていることを排水量で確認した。なお、各パッカーの収縮排水量は 約 60 分間計測した。

6.4.4 原位置試験結果

実施したポイント希釈試験、単孔式注水揚水試験、ダイポール試験の結果を試験ごとに示す。

なお、試験名は表 6.4.4-1 に示すように、試験種目+注入孔の名称+観測孔に設置した装置名+同 試験種目の試験順の番号に従い行った。

表	6	4	4 - 1	試驗名	の読み方
13	υ.	т.	TI		

試験種目	D:ポイント希釈試験、S:単孔式注水揚水試験、W:ダイポール試験
注水孔の名称	0:12MI30号孔, 1:12MI31号孔
観測孔に設置した装置名	T:トレーサー試験装置, M:間隙水圧モニタリング装置
同種試験における試験番号	1,2,3…

6.4.4.1 ポイント希釈試験結果

トレーサー試験装置を用いたポイント希釈試験を実施した。ポイント希釈試験では試験孔 12MI30 と試験孔 12MI31 でそれぞれ1ケースずつ計2ケースを実施した。試験ケースを表 6.4.4-2 に示す。ま た、トレーサーには蛍光トレーサーとしてウラニンとアミノG酸を用い、溶液の濃度は 3mg/Lを目標 として調整した。ただし、今回の試験においてはウラニンの濃度のみを計測した。

試験結果を図 6.4.4-1 および図 6.4.4-2 に示す。なお、間隙水圧や流量のデータの振幅はプランジャーポンプの脈動によるものである。

	試験名		DOM1	D1T2	
	対象孔	12MI30	12MI31		
きまたの問	上端深度	mabh	24.46	24. 04	
こ こう	下端深度	mabh	24. 66	24. 24	
	開始	-	9/13 10:20	9/19 14:46	
試験時間	終了	-	9/15 8:20	9/22 9:50	
	実施時間	-	46:00	67:09	
トレーサー	ウラニン	mg/L	2. 940	2. 970	
	アミノ G 酸*1	mg/L	3	3	
	重水素	mg/L	-	-	
	硫酸バリウム	mg/L	-	-	
	塩化ルビシウム	mg/L	-	-	
	ヨウ化カリウム	mg/L	-	-	
蛍光濃度センサー	C1	-	Ver.2 地上	Ver.2 地上*2	
(太字がメイン)	C2	-	-	Ver.3 孔内	
	注水流量	mL/min	100	100	
条件	揚水流量	mL/min	100	100	
	トレーサー注入	min	50	15	
	供 来	*1:アミノ G 酸は希釈値			
	调石	*2:D1T2 時の C1 センサーは計測値 OVER			

表 6.4.4-2 ポイント希釈試験実施ケース









1.70

1.65

E 1.55

1.50

1.45

1.40 9/13 0:00

And

9/13 12:00

9/14 0:00







図 6.4.4-2 12MI31 のポイント希釈試験結果

(1) 地下水通過流量の算出方法

ポイント希釈試験の DOM1、D1T2 より得られた希釈速度より以下の式を用いて自然状態での地下水 通過流量および岩盤割れ目内の単位幅あたりに流れる地下水流量を推定した。

 Q_{bh} :地下水流量(mL/min)

V:区間容量(mL)

C:時刻 t における試験区間内のトレーサー濃度(mg/L)

 C_0 : 初期のトレーサー濃度(mg/L)

t:時刻(min)

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

Q_{bh}:地下水流量(mL/min)

α:集水効果を表す係数(=2.0)

*r*_w:ボーリング孔半径 (m)

ここで、ボーリング孔半径は 0.043m、区間容量は、試験孔 12MI30 は 1103mL(チューブ容量 1021mL (長さ 81.27m)、試験区間容量 82mL)、試験孔 12MI31 は、1530mL L(チューブ容量 1448mL(長さ 115.27m)、 試験区間容量 82mL) である。 (2) DOM1 (12MI30 号孔)

図 6.4.4-3 に DOM1 試験における濃度を ln(C/C₀)で整理した希釈変化率を示す。なお、グラフ内 における線形近似は、最小二乗法を用いて求めた。



図 6.4.4-3 DOM1 試験時の濃度経時変化

自然状態での地下水通過流量および岩盤割れ目内の単位幅あたりに流れる地下水流量実験データ より得られた希釈変化率より、希釈速度は以下のように考えられる。

$$\frac{d\ln(C/C_0)}{dt} = |a| \approx 2.9 \times 10^{-4}$$

よって、自然状態での地下水通過流量および岩盤割れ目内の単位幅あたりに流れる地下水流量は、 次式によりが 1.86mL/min/m と得られた。

$$Q_{bh} = V \times \frac{d \ln(C/C_0)}{dt} = 1103 \times 2.9 \times 10^{-4} \approx 3.2 \times 10^{-1} \quad [mL/\min]$$
$$q_f = \frac{Q_{bh}}{\alpha \times 2r} = \frac{3.2 \times 10^{-1}}{2 \times 0.086} = 1.86 \quad [mL/\min/m]$$

(3) D1T2(12MI31)

図 6.4.4-4 に D1T2 試験における濃度を ln(C/C₀)で整理した希釈変化率を示す。なお、グラフ内 における線形近似は、最小二乗法を用いて求めた。



図 6.4.4-4 D1T2 試験時の濃度経時変化

自然状態での地下水通過流量および岩盤割れ目内の単位幅あたりに流れる地下水流量実験データ より得られた希釈変化率より、希釈速度は以下のように考えられる。

$$\frac{d\ln(C/C_0)}{dt} = |a| \approx 2.87 \times 10^{-4}$$

よって、自然状態での地下水通過流量および岩盤割れ目内の単位幅あたりに流れる地下水流量は、 次式により 2.55mL/min/m が得られた。

$$Q_{bh} = V \times \frac{d \ln(C/C_0)}{dt} = 1530 \times 2.87 \times 10^{-4} \approx 4.4 \times 10^{-1} \quad [mL/\min]$$
$$q_f = \frac{Q_{bh}}{\alpha \times 2r} = \frac{4.4 \times 10^{-1}}{2 \times 0.086} = 2.55 \quad [mL/\min/m]$$

(4) 地下水通過流量の算出結果

DOM1 と D1T2 のポイント希釈試験の結果を表 6.4.4-3 に示す。また、表 6.4.4-3 では、ポイント 希釈試験の結果と合わせて、各試験区間近傍(透水試験区間に今回実施したポイント希釈試験区間 は内包されている)で実施した水理試験結果やポイント希釈試験時に確認したプランジャーポンプ の脈動がレスポンスした区間についても整理した。

	試験		DOM1	D1T2	
	対象	12MI30	12MI31		
	沃水計除反明	上端深度	mabh	24. 30	23. 55
結果	遊水試験区间	下端深度	mabh	25. 00	24. 25
水理試験	·v·四 つ -	透水量係数	m²/s	2.91E-05	8. 88E-07
	水理ファクター	湧水量	L/min	2. 54	0. 19
書	计段反明	上端深度	mabh	24. 46	24. 04
	武鞅区间	下端深度	mabh	24. 66	24. 24
討 馬	ポイント希釈試験結果	自然通過流量	mL/min	1.86	2. 55
、 ト 米 米 二		試錐孔名−区	間名	12MI31-Int1	12MI30-P2
	圧力応答	上端深度	mabh	23. 12	24. 46
۲ ۲		下端深度	mabh	26.00	24. 66

表 6.4.4-3 ポイント希釈試験結果と水理ファクター

表 6.4.4-3の水理ファクターとポイント希釈試験の自然通過流量とを比較すると透水量係数が大 きく湧水量も多い 12MI30 号孔より 12MI31 号孔の試験区間の方がわずかではあるが自然通過流量が 大きかった。

また、DOM1 の圧力応答は、12MI30 号孔の 24.46~24.66mabh から 12MI31 号孔の 23.12~26.00mabh (モニタリング装置の Int1 区間) で観測された。圧力応答比としては、1/41 程度であった。DOT2 の圧力応答は、12MI31 号孔の 24.04~24.24mabh から 12MI30 号孔の 24.46~24.66mabh で観測され た。D1T2 の圧力応答比は 1/171 程度と小さなものであった。

6.4.4.2 単孔式注水揚水試験結果

(1) 試験条件

単孔式トレーサー試験は、ポイント希釈試験と同様に 12MI30 号孔の 24.46~24.66mabh(以下、 12MI30D1 と呼ぶ)と 12MI31 号孔の 24.04~24.24mabh(以下、 12MI31D1 と呼ぶ)の 2 区間で実施した。表 6.4.4-4、表 6.4.4-5 に 12MI30D1、 12MI31D1 における試験条件を示す。試験は、 12MI30D1 で 6 回、 12MI31D1 で 4 回実施した。保存性トレーサーとして、ウラニン、アミノ G 酸、重水素(以下、 δ D と記載)、ヨウ素(以下 I と記載)を用い、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 と記載)を用い、それぞれのトレーサーを原位置でサンプリングされた地下水を溶媒として混合した。各トレーサーの設定濃度は、ウラニン、アミノ G 酸は 3mg/L、 δ D は 1 万倍希釈(約 550‰)、I は 3mg/L、Rb は 3mg/L、Ba は 1.2mg/L とした。SOM1、SOT8 は保存性トレーサーのみ(I を除く)、その他の試験条件については全種類のトレーサーを使用した。

各孔にトレーサー試験装置を設置後、区間から湧水する地下水の流量を計測したところ、12MI30D1 からは約 2L/min、12MI31D1 からは約 0.18L/min の地下水が湧水することを確認した。従って、 12MI30D1 での揚水流量は 500mL/min、12MI31D1 での揚水流量は 100mL/min を上限値とした。

\$	对象孔一区間		12MI30 - D1							
	試験名		SOM1	SOM2	SOM3	SOT8	SOT9	S0T10		
	開始 (トレーサー注	主入)	9/15 16:10	9/16 10:30	9/17 9:30	9/29 10:35	10/2 9:20	10/2 14:55		
試験時間	終了 (計測終了)		9/16 8:10	9/17 9:25	9/17 15:05	9/29 13:25	10/2 13:10	10/2 19:15		
	実施時間	1	16:00	22:55	5:35	2:50	3:50	4:20		
	ウラニン	/	0	0	0	0	0	0		
	アミノ G	酸	0	0	0	0	0	0		
ы. ж	δ D		0	0	0	-	0	0		
トレーサー	Ι-		-	0	0	-	0	0		
	R b⁺		-	0	0	-	0	0		
	B a ²⁺		-	0	0	_	0	0		
蛍光濃度	C1		Ver.1	Ver.1	Ver.1	Ver.1	Ver.1	Ver.1		
センサー (太字が	C2		使用不可	使用不可	使用不可	使用不可	使用不可	使用不可		
メイン)	C3		Ver.2	Ver.2	Ver.2	Ver.2	Ver.2	Ver.2		
	注入流量	mL/min	(500)	(500)	(500)	(500)	81	457		
	揚水流量	mL/min	501	505	(500)	504	100	475		
試験条件	トレーサー 注入	min	10	10	10	10	10	10		
	トレーサー 回収 (揚水)	min	10	10	10	10	10	10		
	待機	min	30	20	0	0	0	120		

表 6.4.4-4 単孔式注水揚水試験実施ケース(試験孔 12MI30)

※ 括弧書きで記載した値は計器の不具合により流量データが得られなかったため、ポンプの設定値。 それ以外は流量計による計測値の平均値。

Ŕ	讨象孔一区間		12MI31 - D1					
	試験名		S1T4	S1T5	S1T6	S1T7		
	開始 (トレーサー注	主入)	9/22 14:00	9/22 15:40	9/23 10:10	9/23 14:10		
試験時間	終了 (計測終了)		9/22 15:40	9/23 9:05	9/23 13:05	9/24 8:20		
	実施時間	Ð	1:40	17:25	2:55	18:10		
	ウラニン	/	0	0	0	0		
	アミノ G	酸	0	0	0	0		
ы. н	δD		0	0	0	0		
トレーサー	Ι-		0	0	0	0		
	Rb⁺		0	0	0	0		
	B a ²⁺		0	0	0	0		
蛍光濃度	C1		Ver.2	Ver.2	Ver.2	Ver.2		
センサー (太字が	C2		Ver.3	Ver.3	Ver.3	Ver.3		
メイン)	C3		-	-	-	-		
	注入流量	mL/min	97	96	98	98		
	揚水流量	mL/min	113	116	117	118		
試験条件	トレーサー 注入	min	20	10	5	5		
	トレーサー 回収 (揚水)	min	20	5	5	5		
	待機	min	0	0	0	30		

表 6.4.4-5 単孔式注水揚水試験実施ケース(試験孔 12MI31)

なお、ボーリング孔半径は 0.043m、試験に用いた配管の容量は、試験孔 12MI30 号孔の SOM1~SOM3 は 1018mL (チューブ容量 938m (長さ 74.68m)、ポンプ容量 80mL)、SOT8~SOT10 は 952mL (チューブ 容量 872mL (長さ 69.46m)、ポンプ容量 80mL)。また、試験孔 12MI31 号孔の S1T4~S1T7 までは 1137mL (チューブ容量 1057mL (長さ 84.16m)、ポンプ容量 80mL) である。

(2) 試験結果

各試験条件における試験結果について、蛍光センサーで計測したウラニンの濃度変化と、試験時 に対応する各孔の間隙水圧変化を図 6.4.4-5~図 6.4.4-14 に示す。



図 6.4.4-5 単孔式注水揚水試験 SOM1 結果

1///

※ C2の蛍光濃度センサーは使用不可

※ 図の蛍光濃度はC3の値を用いた。

1.55

1.50

1.45

1.40

1.35

1.30

9/15 12:00 9/15 14:00 9/15 16:00 9/15 18:00 9/15 20:00 9/15 22:00 9/16 0:00 9/16 2:00 9/16 4:00 9/16 6:00 9/16 8:00 9/16 10:00

日時

C1

フラクション コレクター

揚水装置部











※ 図の蛍光濃度はC3の値を用いた。

図 6.4.4-6 単孔式注水揚水試験(SOM2)結果




[※] C2 の蛍光濃度センサーは使用不可 ※ 図の蛍光濃度は C3 の値を用いた。

9/17 8:00 9/17 9:00 9/17 10:00 9/17 11:00 9/17 12:00 9/17 13:00 9/17 14:00 9/17 15:00

日時

図 6.4.4-7 単孔式注水揚水試験 SOM3 結果











1.90

1.70

1.50

▲ 新日 1.30

∑ □ 1.10

0.90

※ 12MI31 号孔では C2 の蛍光濃度センサーが良好であったため C2 のみを用いた。

図 6.4.4-8 単孔式注水揚水試験 S1T4 結果









※ 12MI31 号孔では C2 が良好であったため C2 のみを用いた。

図 6.4.4-9 単孔式注水揚水試験 S1T5 結果







※ 12MI31 号孔では C2 が良好であったため C2 のみを用いた。

図 6.4.4-10 単孔式注水揚水試験 S1T6 結果









※ 12MI31 号孔では C2 が良好であったため C2 のみを用いた。

図 6.4.4-11 単孔式注水揚水試験 S1T7 結果















[※] C2 の蛍光濃度センサーは使用不可 ※ 図の蛍光濃度は C3 の値を用いた。

図 6.4.4-12 単孔式注水揚水試験 SOT8 結果













[※] C2 の蛍光濃度センサーは使用不可 ※ 図の蛍光濃度は C3 の値を用いた。

× 四の虫儿候皮はいの個を用いた。

図 6.4.4-13 単孔式注水揚水試験 S0T9 結果





田米逍鼎1.55

1.5

1.45

- 13M I36_Int5

- 13M I36_Int6

- 131/137_Int3 - 131/137_Int4 - 131/137_Int5

3.90 员 I 3MI36,

60 Ę

編 1.55

1.50

1.45

1.40



- 王/朱衡唱刊 1.56

1.5/

1.52

1.5

≥ ∏ 1.50

1.45

1.40

※ 図の蛍光濃度はC3の値を用いた。

 1.40
 1
 1
 1.50

 10/2 12:00
 10/2 14:24
 10/2 19:12
 10/2 21:36
 10/3 0:00
 10/3 2:24
 10/3 4:48
 10/3 7:12
 10/3 9:36

日時

図 6.4.4-14 単孔式注水揚水試験 S0T10 結果





6.4.4.3 ダイポール試験

ダイポール試験では試験ごとにダイポール比を変えながら、12MI31 号孔にトレーサーを注入して 12MI30 号孔から揚水する試験を7ケース、12MI30 号孔にトレーサーを注入して 12MI31 号孔から揚水 する試験を3ケース実施した。12MI30 号孔を揚水孔とした試験ケースを表 6.4.4-6 に、12MI31 号孔を 揚水孔とした試験ケースを表 6.4.4-7 に示す。保存性トレーサーとして、ウラニン、アミノG酸、重 水素(以下、 δ D と記載)、ヨウ素(以下Iと記載)を用い、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 と記載)を用い、それぞれのトレーサーを原位置でサンプリン グされた地下水を溶媒として混合した。各トレーサーの設定濃度は、ウラニン、アミノG酸は 3mg/L、 δ D は1万倍希釈(約 550‰)、I は 3mg/L、Rb は 3mg/L、Ba は 1.2mg/L とした。

試験結果を図 6.4.4-15~図 6.4.4-24 に示す。

W0T7~W0T9 については、揚水過程の同一ライン上で Ver.2 と Ver.3 の蛍光濃度センサーでトレーサ ー濃度の測定を行った。この結果、Ver.2 と Ver.3 で測定したトレーサーのピーク濃度が異なること が確認された。この理由については、Ver.2 のセンサーは急遽用意していることもあり、当該作業内 で検証することができておらず、来年度以降に同様なセンサーの配置での試験を実施して検証するこ とを考えている。

2	主水孔一区間	12MI31 - D1							
ŧ	揚水孔−区間				1	2MI30 - D	1		
試験名 W1T1 W1T2 W1T3 W1T4 W1T5 W1T6						W1T10			
	開始		9/24	9/24	9/25	9/25	9/26	9/27	10/1
	(トレーサー注	主入)	10:50	14:20	11:06	14:50	11:00	10:30	10:37
試験時間	終了		9/24	9/25	9/25	9/26	9/27	9/29	10/1
	(計測終了)		13:10	8:00	13:36	8:20	8:30	8:10	13:47
	実施時間	1	2:20	17:40	2:30	17:30	21:30	21:40	3:10
	ウラニン	/	0	0	0	0	0	0	0
	アミノG酸		0	0	0	0	0	0	0
<u>ці н</u>	δD		_	-	0	0	0	-	_
トレーサー	I -		_	-	_	_	0	-	_
	R b⁺		_	-	-	-	0	-	-
	B a ²⁺		_	1	_	_	0	Ι	_
畄光濃度	C1		Ver.1	Ver.1	Ver.1	Ver.1	Ver.1	Ver.1	Ver.1
センサー	C2-1	C2-1		Ver.3	Ver.3	Ver.3	Ver.3	Ver.3	Ver.3
(太字が	C2-2		使用不可	使用不可	使用不可	使用不可	使用不可	使用不可	使用不可
メイン)	C3		Ver.2	Ver.2	Ver.2	Ver.2	Ver.2	Ver.2	Ver.2
	注入流量	mL/min	122	100	100	50	50	20	20
	揚水流量	mL/min	1000	508	300	300	200	200	300
試験条件	トレーサー 注入	min	10	10	10	10	10	10	10
	トレーサー 回収 (揚水)	min	140	1060	150	1050	1290	1300	190

表 6.4.4-6 12MI30 を揚水孔としたダイポール試験実施ケース①

2	主水孔一区間		12MI30 - D1						
1	揚水孔−区間			12MI31 - D1					
	試験名		WOT7	WOT8	WOT9				
試験時間	開始 (トレーサー注	主入)	9/29 15:00	9/30 10:30	9/30 15:50				
	終了 (計測終了)		9/30 8:15	9/30 13:30	10/1 8:10				
	実施時間	実施時間		17:15 3:00 16 O O O O O O - - O - O	16:20				
	ウラニン	/	0	0	0				
	アミノG	酸	0	0	0				
トレーサー	δ D		-	-	0				
	Ι -		-	-	0				
	R b⁺		_	-	0				
	R b ⁺ B a ²⁺		_	_	0				
蛍光濃度	C1		Ver.1	Ver.1	Ver.1				
センサー	C2-1	C2-1		使用不可	使用不可				
(太字が	C2-2		Ver.3 Ver.3		Ver.3				
メイン)	C3		Ver.2	Ver.2	Ver.2				
	注入流量	mL/min	50	20	20				
	揚水流量	mL/min	100	200	120				
試験条件	トレーサー 注入	min	10	10	10				
	トレーサー 回収(揚水)	min	1035	180	980				

表 6.4.4-7 12MI31 を揚水孔としたダイポール試験実施ケース

なお、ボーリング孔半径は 0.043m、試験に用いた配管の容量は、揚水孔が 12MI30 号孔の W1T1 は 1045mL (チューブ容量 965mL (長さ 76.87m)、ポンプ容量 80mL)、W1T2~W1T6 および W1T10 は 842mL (チ ューブ容量 762mL (長さ 60.71m)、ポンプ容量 80mL)。また、揚水孔が 12MI31 号孔の W0T7~W0T9 は 1056mL (チューブ容量 976mL (長さ 77.71m)、ポンプ容量 80mL) である。





世

B 1.40

1.30





1.70

1.60

번 大統語 1.50

1.30

1.20

※ C2-2の蛍光濃度センサーは使用不可

図 6.4.4-15 ダイポール試験 W1T1 結果

1.20 9/24 10:04 9/24 10:33 9/24 11:02 9/24 11:31 9/24 12:00 9/24 12:28 9/24 12:57 9/24 13:26 9/24 13:55

日時





※ C2-2 の蛍光濃度センサーは使用不可

1.10

1.40 9/24 12:00 9/24 14:24 9/24 16:48 9/24 19:12 9/24 21:36 9/25 0:00 9/25 2:24 9/25 4:48 9/25 7:12 9/25 9:36 9/25 12:00 日時

図 6.4.4-16 ダイポール試験 W1T2 結果









1.75

1.70

1.65

₹ 1.60

1.55

1.50

1.45



日時

- 13MI36 Int 3

- 13MI36 Int4

- 13MI36 Int 5

- 13MI36 Int 6

- 1.50 闘

1.45

1.40







図 6.4.4-17 ダイポール試験 W1T3 結果







※ C2-2 の蛍光濃度センサーは使用不可

図 6.4.4-18 ダイポール試験 W1T4 結果















※ C2-2の蛍光濃度センサーは使用不可

図 6.4.4-19 ダイポール試験 W1T5 結果







[※] C2-2 の蛍光濃度センサーは使用不可

図 6.4.4-20 ダイポール試験 W1T6 結果



 1.50
 1.10

 9/29 12:00
 9/29 14:24
 9/29 16:48
 9/29 12:36
 9/30 0:00
 9/30 2:24
 9/30 7:12
 9/30 9:36
 9/30 12:00

日時

d 1.56

À

٣<u>1.5</u>4

1.52

93 **6**8

1.30

1.20



 1.50
 1.10

 9/29 12:00
 9/29 14:24
 9/29 16:48
 9/29 11:12
 9/29 21:36
 9/30 0:00
 9/30 2:24
 9/30 7:12
 9/30 9:36
 9/30 12:00

dd 1.56

볓

間隙対

2MI

匠 山.54

1.52



₹ 1.56

₩ 1.54

1.52

1.30

1.20

図 6.4.4-21 ダイポール試験 WOT7 結果









※ C2-1の蛍光濃度センサーは使用不可

図 6.4.4-22 ダイポール試験 WOT8 結果









図 6.4.4-23 ダイポール試験 WOT9 結果









図 6.4.4-24 ダイポール試験 W1T10 結果



6.4.5 化学分析結果

化学分析では、原位置試験で採水したサンプリング試料の成分分析を実施した。原位置でのトレー サー試験では、蛍光トレーサーのウラニンのみを対象に計測を実施しているが、化学分析ではこれに 加えその他のトレーサーについても成分分析を実施した。これより、原位置試験との比較、保存性ト レーサーと収着性トレーサーの破過曲線を比較し物質移行の遅延効果について調査した。

6.4.5.1 分析項目

トレーサー試験で採取した試料について実施した分析項目と分析方法を表 6.4.5-1 に示す。

分析項目	分析法	使用装置		
Ph Ro I	ICD	Agilent Technologies社製		
NU, DA, I	TOF頁重力例伝(ICF_MS)	Agilent 7500Ce		
水 書 酔 書 同 位 休 比 (5 D)	二志八托 _ 质县八托汁	Los Gatos Research社製		
水素酸素同位体比(ð D)	几条万仞一頁重万仞伝	水同位体分析装置DLT-100		
ウラーンマミンの	兴业八业八七社	日立ハイテクノロジーズ社製		
ワフニン、アミノロ	虫 元万元分析法	日立分光蛍光光度計F-7000		

表 6.4.5-1 分析項目と分析方法

6.4.5.2 前処理方法

試料を 0.45µm フィルターでろ過し、目的項目の予想濃度、岩石基質や妨害元素と装置への負荷を考慮して希釈した。ICP-MS 分析用溶液は 1mo1/L 硝酸ベースとなるよう調製した。

6.4.5.3 単孔式注水揚水試験の分析結果

(1) 回収率

単孔式注水揚水試験の試験手順で述べたように、フラクションコレクターでサンプリングされず に分岐して排水されるトレーサーは、回収タンクで回収した。SOM1、S1T4、S1T5、S1T6、S1T7 につ いては揚水開始から 60 分経過時点で、SOM2、SOM3、SOT8、SOT9、SOT10 については揚水開始から 120 分経過時に回収タンクからサンプリングを行い、その分析結果を基に回収率を算定した。表 6.4.5-2、 表 6.4.5-3 に各トレーサーの回収率を示す。なお、回収率を計算する際は、2013 年に 12MI30 号孔、 12MI31 号孔から採水を行った結果に基づき、I は 74.67ppb、Rb は 4.32ppb、Ba は 1.72ppb、δD は -59.56‰をバックグラウンド濃度とし、注入量、回収量から差し引いて計算した。ウラニン、アミ ノ G 酸のバックグラウンド濃度は 0 とした。

a. トレーサーの信頼性

各試験条件において、ウラニン、アミノG酸、δDの回収率は概ね一致しており、保存性トレー サーとして信頼性が高いと考えられる。一方、Iの回収率は、他の保存性トレーサーの回収率とは 大きく異なった。これは、Iのバックグラウンド濃度が高いことが関係していると考えられるが、 詳細については不明である。また、後に示す各試験で得られた破過曲線では、ウラニン、アミノG 酸、δDの経時変化は概ね一致するのに対し、Iの経時変化は他の保存性トレーサーとは明らかに 挙動を示した。また、試験条件によってはIの経時変化がドリフトする様子も確認された。以上の ことから、今回の試験ではIについての信頼性は他の保存性トレーサーに比べて低いと言える。 b. 保存性トレーサーと吸着性トレーサーの違い

今回は保存性トレーサーの回収率が最高でも約 40%と低く、相当の量がバックグラウンドの地下 水流れによって流されたと考えられる。一方、吸着性トレーサーの回収率は、全体的に保存性トレ ーサーの回収率よりも高くなった。従って、程度は未だ不明であるが、トレーサーが有する吸着の 効果のために、保存性トレーサーよりもバックグラウンドの地下水に流されにくかったと推測され る。

c. 12MI30D1 での回収率の減少

SOM1、SOM2、SOM3 と比べて SOT8、SOT9、SOT10 の回収率は全体的に低く、特に SOM1 と SOT8 は試 験条件が同じであっても回収率に約 5%の違いがあった。これは、SOM1、SOM2、SOM3 の試験時には 12MI31D1 に間隙水圧モニタリング装置が設置されていたのに対し、SOT8、SOT9、SOT10 の試験時に は 12MI31D1 にトレーサー試験装置が設置されていたことと強く関係していると考えられる。

Ē	試験条件名		S0M1 S0M2 S0M3 S0T8 S0T9 S					
	対象孔			•	12MI	30 D1		
	注水流量	mL/min	(500)	(500)	(500)	(500)	81	457
=+ F \$~∕2/₩	揚水流量	mL/min	501	505	(500)	504	100	475
試験条件	トレーサー注入	min	10	10	10	10	10	10
	チェーサー注入	min	10	10	10	10	10	10
	待機	min	30	20	0	0	0	120
	ウラニン	ppm	(3.0)	2.807	2.684	(3.0)	2.704	2.704
	アミノG酸	ppm	-	3.548	3.655	-	3.245	3.245
トレーサー	δD	‰	-	559	568	-	574	574
「原液濃度 「	I_	ppm	-	2.564	2.254	-	3.020	3.020
	Rb⁺	ppm	-	2.195	2.034	-	2.030	2.030
	Ba ²⁺	ppm	-	1.064	1.430	-	1.069	1.069
回収濃度	ウラニン	ppm	0.106	0.059	0.088	0.041	0.011	0.006
	アミノG酸	ppm	-	0.081	0.128	-	0.014	0.008
	δD	‰	-	-44	-37	-	-58	-58
	I_	ppm	_	0.114	0.110	-	0.109	0.092
	Rb⁺	ppm	-	0.090	0.105	-	0.068	0.039
	Ba ²⁺	ppm	-	0.045	0.051	-	0.044	0.027
	ウラニン	ppm	21.2%	25.5%	39.3%	16.5%	5.9%	2.8%
	アミノG酸	ppm	_	27.5%	41.9%	-	6.2%	3.1%
同业委	δD	‰	_	29.7%	42.4%	-	3.3%	2.2%
凹収平	I_	ppm	_	19.1%	19.2%	_	17.0%	7.3%
	Rb ⁺	ppm	_	47.5%	59.5%		46.5%	21.1%
	Ba ²⁺	ppm	_	49.9%	41.5%	_	58.3%	29.5%

表 6.4.5-2 12MI30D1 における回収率

※ 回収濃度、回収率について、青字は揚水開始から 60 分経過時の計測値を、赤字は揚水開始から 120 分経過 時の値であることを意味する。

試験条件名			S1T4	S1T5	S1T6	S1T7
	対象孔			12MI	31 D1	
	注水流量	mL/min	97	96	98	98
	揚水流量	mL/min	113	116	117	118
試験条件	トレーサー注入	min	20	10	5	5
	チェーサー注入	min	20	5	5	5
	待機	min	0	0	0	30
	ウラニン	ppm	2.518	2.518	2.434	2.434
トレーサー 原液濃度	アミノG酸	ppm	3.569	3.569	3.543	3.543
	δD	‰	568	568	567	567
	I_	ppm	2.663	2.663	2.569	2.569
	Rb⁺	ppm	2.198	2.198	2.137	2.137
	Ba ²⁺	ppm	1.103	1.103	1.173	1.173
回収濃度	ウラニン	ppm	0.044	0.076	0.045	0.014
	アミノG酸	ppm	0.066	0.111	0.068	0.022
	δD	‰	-48	-42	-48	-58
凹収辰反	I_	ppm	0.160	0.178	0.141	0.118
	Rb⁺	ppm	0.169	0.224	0.095	0.070
	Ba ²⁺	ppm	0.078	0.106	0.039	0.032
	ウラニン	ppm	6.1%	21.7%	26.3%	8.6%
	アミノG酸	ppm	6.5%	22.5%	27.5%	9.1%
同业率	δD	‰	6.6%	20.7%	26.9%	3.6%
山水平	I_	ppm	11.5%	28.9%	38.0%	25.1%
	Rb⁺	ppm	26.3%	72.3%	60.9%	44.8%
	Ba ²⁺	ppm	24.2%	68.6%	45.4%	37.0%

表 6.4.5-3 12MI31D1 における回収率

※ 回収濃度、回収率について、青字は揚水開始から 60 分経過時の計測値を、赤字は揚水開始から 120 分経過 時の値であることを意味する。

(2) 破過曲線

揚水を行ってトレーサーを回収する際は、フラクショ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 6.4.5-4 に各試験条件におけるフラクショ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。揚水流量 を 500mL/min と設定して行った試験条件(S0M2、S0M3、S0T10)については分画時間を 15~20 秒、 揚水流量を 100mL/min と設定して行った試験条件(S0T9、S1T4、S1T5、S1T6、S1T7)については分 画時間を 50~60 秒とし、全ての試験条件でインターバルは 60 秒とした。

フラクショ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する。

	インターバル	分画時間
SOM1	サンプリン	/グ不実施
SOM2	60 秒	15 秒
SOM3	60 秒	15 秒
S0T8	サンプリン	~グ不実施
S0T9	60 秒	60 秒
S0T10	60 秒	15~20 秒
S1T4	60 秒	55 秒
S1T5	60 秒	55 秒
S1T6	60 秒	50 秒
S1T7	60 秒	50 秒

表 6.4.5-4 フラクションコレクターの設定

各試験条件の破過曲線を図 6.4.5-1~図 6.4.5-8 に示す。 I、Rb、Ba 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/C₀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/C₀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、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。

いずれの試験条件においても、ウラニン、アミノG酸、δDは概ね似た破過曲線となるが、Iに ついては他の保存性トレーサーの破過曲線とは異なった。先にも述べたように、Iのバックグラウ ンド濃度が高いことに起因すると考えられ、今回は評価には用いない。また、保存性トレーサーの 破過曲線と吸着性トレーサーの破過曲線には違いが見られ、試験条件によっては吸着性トレーサー のRbとBaの破過曲線にも違いがあった。



※グラフの凡例には揚水開始から120分の回収率を記載。





※グラフの凡例には揚水開始から120分の回収率を記載。

図 6.4.5-2 SOM3 破過曲線



※グラフの凡例には揚水開始から120分の回収率を記載。





※グラフの凡例には揚水開始から120分の回収率を記載。

図 6.4.5-4 SOT10 破過曲線



※グラフの凡例には揚水開始から 60 分の回収率を記載





※グラフの凡例には揚水開始から60分の回収率を記載。

図 6.4.5-6 S1T5 破過曲線



※グラフの凡例には揚水開始から 60 分の回収率を記載





※グラフの凡例には揚水開始から60分の回収率を記載。

図 6.4.5-8 S1T7 破過曲線

6.4.5.4 ダイポール試験の分析結果

各トレーサーの破過曲線を描くために、フラクションコレクターでサンプリングした試料の化学分 析を行った。12MI31 号孔を試験対象としたケース W1T5 の破過曲線を図 6.4.5-9 に、12MI30 号孔を試 験対象としたケース W0T9 の破過曲線を図 6.4.5-10 に示す。ただし、ウラニンについては、サンプリ ング試料の輸送・保管の問題か、分析の問題か、原因は不明であるが、有意な破過曲線が得られなか ったため掲載していない。破過曲線を作成する上で、各試料の分析結果からバックグラウンド濃度を 差し引いた値をトレーサー原液濃度(分析値)で割った値で表示した。また、水素酸素同位体比(δD) については、分析時にトレーサー原液に対する混入率を計算しているため、そのまま掲載した。なお、 デッドボリューム、チューブ内分散については補正していない。

W1T5 では、保存性トレーサーのうちアミノG酸と δ Dの破過曲線は良く一致している。一方、Fの 破過曲線は、いずれの時刻においてもアミノG酸や δ Dの濃度を上回っており、保存性トレーサーで あるにも係わらずテールの部分が下がりにくくなっている。この原因は不明であるが、アミノG酸と δ Dが良く一致していることから、保存性トレーサーとしてのFの信頼性は劣るものと考える。アミ ノG酸と δ Dではトレーサー注入開始から 19分経過した頃に濃度がピークに達しているが、収着性ト レーサーである Rb⁺では 30分過ぎ、Ba²⁺では 60分過ぎにピークに達し、濃度 C/C₀のピーク値も Rb⁺で は δ Dの約 1/8、Ba²⁺では δ Dの約 1/35 となり、吸着の影響が見られる。また、回収率は、 δ Dでは 78 分後に 53.7%であり、Rb⁺では 78分後に 20.3%、1260分後に 53.3%、Ba²⁺では 78分後に 5.1%、1260 分後に 40.9%であった。

W0T9 では、保存性トレーサーのうちアミノG酸と δ Dの破過曲線はやはり良く一致するが、I の破 過曲線もテールの部分を含めてこれらの破過曲線に比較的近いものとなっている。いずれの保存性ト レーサーも、注入開始から 30 分過ぎに濃度がピークに達している。収着性トレーサーである Rb⁺では 70 分後頃に濃度はピークに達し、ピーク値は δ D の約 1/11 となっている。一方、Ba²⁺では分析値がバ ックグラウンド濃度とほとんど変わらず、破過曲線のピークの判別はできなかった。また、回収率は、 δ D では 100 分後に 25.1 %であり、Rb⁺では 100 分後に 5.4 %、960 分後に 20.5 %であった。



図 6.4.5-10 WOT9 破過曲線

6.4.6 単孔注入揚水試験の評価

6.4.6.1 透水量係数の評価

各試験条件において、トレーサーの回収(揚水)を行っている際の間隙水圧計測結果より、透水量 係数を算定した。透水量係数の算定結果を表 6.4.6-1 に示す。また、透水量係数の算定式を式(6.4.6-1)、 (6.4.6-2)に示す。

$$T_s = \frac{Q_p}{2\pi\Delta H} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right) \tag{6. 4. 6-1}$$

 $\Box \Box \mathcal{C}, \qquad \Delta \mathbf{H} = H_0 - H_p$

(6.4.6-2)

 $T_s: 透水量係数、Q_p: 揚水流量、R:影響圏半径、<math>r_0: ボーリング孔半径、H_0: 初期間隙水圧、H_p: 揚水時の間隙水圧$

	同時	透水量係数	透水量係数平均值
	区间	$[m^2/sec]$	$[m^2/sec]$
SOM1		6. 05×10^{-7}	
SOM2		9. 71×10^{-7}	
SOM3	10010001	_	7 40 × 10 ⁻⁷
S0T8	12M130D1	6.55 $\times 10^{-7}$	7.46×10
S0T9		8.89×10^{-7}	
S0T10		6. 11×10^{-7}	
S1T4		2.35 \times 10 ⁻⁸	
S1T5	12MI31D1	6. 40×10^{-8}	0.07×10-8
S1T6		3.57×10^{-8}	2.97×10°
S1T7		3.57×10^{-8}	

表 6.4.6-1 透水量係数算定結果

※SOM3:区間圧力の間隙水圧データ欠測。

揚水流量 Q_pは表 6.4.4-4、表 6.4.4-5 に示した値と同じ値を用いた。また、影響圏半径 R は全試験 条件で 5m と統一し、ボーリング孔半径 r₀は 0.043m とした。初期間隙水圧 H₀は、定常場の作成を目的 とした原位置地下水を注入する前の間隙水圧の平均値を用い、揚水時の間隙水圧 H_pはトレーサー回収 時における間隙水圧の安定した時間帯の平均値を用いた。

表 6.4.6-1 に示す通り、各区間の透水量係数の平均値は、12MI30D1 で 7.46×10⁻⁷m²/sec、12MI31D1 で 2.97×10⁻⁸m²/sec となった。これ以降は、この値を共通して用いることとする。

6.4.6.2 破過曲線と回収率の評価

(1) 回収率の評価

各試験条件における保存性トレーサー(ウラニン)と吸着性トレーサー(Rb、Ba)の回収率を図 6.4.6-1 に示す。縦軸を回収率、横軸を注入量と揚水量の体積比 V_{pump}/V_{inj} (以下、体積比と呼ぶ) として整理した。体積比 V_{pump}/V_{inj} は、式(6.4.6-3)を用いて求めた。

$$V_{pump}/V_{inj} = \frac{Q_{pump} \times t_{pump}}{Q_{inj} \times (t_{tr} + t_{ch})}$$
(6. 4. 6-3)

Q_{pump}: 揚水流量、t_{pump}: 揚水時間、Q_{inj}: 注入流量、t_{tr}: トレーサー注入時間、t_{ch}: チェーサー注入時間

保存性トレーサーの回収率は、概ね体積比が大きくなるに従って大きくなる傾向にある。しかし、 待機時間を設けた S1T7(待機時間 30分)、S0T10(待機時間 120分)はこの傾向から外れ、体積比 が大きくなっても回収率は大きくなっていない。但し、SOM2(待機時間 20分)はそれほど回収率 が減少していないことが分かる。一方、吸着性トレーサー(Rb、Ba)の回収率も、体積比が大きく なるに従って回収率は大きくなる傾向にある。待機時間を設けた試験条件であっても、保存性トレ ーサーほど回収率は落ちていない。

RbとBaの回収率の関係を図 6.4.6-2に示す。RbとBaは、SOM3を除く12MI30D1での試験条件(SOM2、SOT9、SOT10)でBaの回収率の方がRbの回収率よりも高く、12MI31D1での試験条件(SIT4、SIT5、SIT6、SIT7)と一部の12MI30D1での試験条件(SOM3)ではRbの回収率の方がBaの回収率よりも大きくなった。一般には、陽イオンの電荷数が大きい方が遅延の影響が大きく、バッチ試験のような流れがない場では陽イオンの電荷数が大きいトレーサーの方が回収率は低くなると考えられる。しかし、今回試験を行った場はバックグラウンド流れを無視することができないほど大きく、さらに注入や揚水によって流速場は更に大きく変化したことが予測される。従って、RbとBaの回収率の関係が試験条件によって異なったと考えられる。

図 6.4.6-3 に平成 25 年度報告書で行った数値解析結果の一例を示す。数値解析は、岩石基質を 考慮しない割れ目モデルを用いて行い、割れ目幅を 1.0mm、縦分散長を 0.5m、注入・揚水流量を 200mL/min、トレーサー注入時間を 250 分、チェーサー注入時間を 250 分、バックグラウンド流れ の動水勾配を 0%、10%とし、遅延係数を 1~100 として行った。図 6.4.6-3 は、揚水開始から約 40 時間後におけるトレーサーの回収率と遅延係数の関係を整理した結果である。バックグランド流れ の動水勾配が 0%の場合は、遅延係数が大きくなるに従って回収率は低下する傾向にある。一方、バ ックグラウンド流れの動水勾配が 10%の場合は、ある値以下の場合、遅延係数が大きくなるに従っ て回収率は増加傾向にある。これは、トレーサーの吸着の効果によってバックグラウンド流れに流 されにくくなるためである。一方、遅延係数がある値以上の場合、遅延係数が大きくなるに従って

- 6-69 -

回収率は減少傾向にある。これは、トレーサーの吸着効果によって、回収孔までトレーサーが辿り つかずに回収できないためである。

このように、吸着性トレーサーの回収率によって遅延の効果を決定するのは困難であると考えら れる。一方、保存性トレーサーは、分散の効果が顕著でない場合、回収率は割れ目幅、バックグラ ウンド流れの動水勾配、注入・揚水流量等と大きく関係する可能性があり、回収率から諸パラメー ターを予測できる可能性がある。



図 6.4.6-1 回収率と注入量と揚水量の体積比の関係



図 6.4.6-3 遅延係数の感度解析結果の一例

(2) 破過曲線の評価

各試験条件の保存性トレーサー(ウラニン)の破過曲線と吸着性トレーサー(Rb、Ba)の破過曲線について、縦軸を比濃度、横軸を注入量と揚水量の体積比 V_{pump}/V_{inj}として整理した結果を図 6.4.6-4、図 6.4.6-6、図 6.4.6-8に示す。割れ目幅が均一な平行平板モデルにおいて、バックグラ ウンド流れの影響がなければ、注入流量や注入時間が異なる場合であっても、トレーサーの注入量 とチェーサーの注入量の体積比が同じであれば、同一区間の分散長や割れ目幅は等しいため濃度が 最大となる体積比 V_{pump}/V_{inj}は等しくなる。今回行った試験は、S1T5 を除き、トレーサー注入量とチ ェーサー注入量の体積比は概ね1:1である(表 6.4.6-2、表 6.4.6-3)。しかし、濃度が最大となる 体積比 V_{pump}/V_{inj}は、保存性トレーサーの場合、12MI30D1で0.2~1.1、12MI31D1で0.6~1.8とバラ つきがあり、吸着性トレーサーの場合も同様のバラつきが確認される。このことから、本試験では バックグラウンドの地下水流れの影響は少なからずあり、また割れ目幅も均一ではない可能性が考

- 6-71 -

えられる。

試験名			S0M1	S0M2	S0M3	S0T8	SOT9	S0T10
	対象孔−区間		12MI30 D1					
	注水流量 mL/min			(500)	(500)	(500)	81	457
試験条件	揚水流量	mL/min	501	505	(500)	504	100	475
	トレーサー注入	min	10	10	10	10	10	10
	チェーサー注入	min	10	10	10	10	10	10
	待機	min	30	20	0	0	0	120
トレーナ	ナー注入量	L	5.0	5.0 5.0 5.0 5.0 0.8 4.6				4.6
チェー !	チェーサー注入量 L 5.0 5.0 5.0 0.8				0.8	4.6		
トレーサー	・チェーサー比	-	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1

表 6.4.6-2 12MI30D1 におけるトレーサーとチェーサーの体積比

表 6.4.6-3 12MI31D1 における	ŀ	レーサーと	ニヲ	チェーサーの位	ふ 積比
-------------------------	---	-------	----	---------	-------------

試験名			S1T4	S1T5	S1T6	S1T7
対象孔−区間			12MI31 D1			
	注水流量	mL/min	97	96	98	98
試験条件	揚水流量	mL/min	113	116	117	118
	トレーサー注入	min	20	10	5	5
	チェーサー注入	min	20	5	5	5
	待機	min	0	0	0	30
トレーサ	トレーサー注入量 L 1.9 1.0 0.5				0.5	
チェーサー注入量		L	1.9	0.5	0.5	0.5
トレーサー	チェーサー比	-	1:1	2:1	1:1	1:1

破過曲線から計算される回収率の経時変化を図 6.4.6-5、図 6.4.6-7、図 6.4.6-9 に示す。破過 曲線から計算される回収率の経時変化は、サンプリングによって得た離散データから計算されるた め、表 6.4.5-2、表 6.4.5-3 に示した値とは若干異なる可能性がある。

保存性トレーサーの回収率の経時変化より、両区間では注入量の約5倍の量を回収した時点で回 収率は一定となっている。従って、これ以上揚水しても回収率は改善しないと考えられる。一方、 吸着性トレーサーの回収率の経時変化は、試験終了時点(揚水開始から60分、或いは120分)で あっても回収率は増加傾向を示しており、揚水時間をさらに長く設けることによって回収率を改善 できた可能性が考えられる。












(3) 待機時間の影響

(a) 12MI30D1 (SOM2 と SOM3)

SOM2 と SOM3 は、待機時間以外の試験条件は同じである。保存性トレーサーの破過曲線において(図 6.4.6-4a)、濃度上昇部は待機時間を 20 分設けた SOM2 の方が急であり、ピーク時の濃度は SOM3 の方が大 きくなるなど、両試験条件で破過曲線の違いが確認された。Rb の破過曲線は(図 6.4.6-6a)、濃度上昇部 分は概ね一致しているが、ピーク時の濃度は SOM3 の方が大きくなった。Ba の破過曲線(図 6.4.6-8a)は、 濃度上昇部、ピーク時の濃度も概ね一致する結果となった。

これは、待機時間中にバックグラウンドの地下水流れによってチェーサーとトレーサーは流されること が関係していると考えられる。つまり、ボーリング孔よりも上流側のチェーサーの浸透前線は、待機時間 を設けない試験条件に比べて待機時間中にボーリング孔に近づく。そのために、破過曲線の濃度上昇部が 急になる。もしくは、待機時間中にボーリング孔内にトレーサーが流入している可能性も考えられる(図 6.4.6-10)。この場合、揚水と同時にボーリング孔内に流れ込んだトレーサーが回収されるため、本来の破 過曲線が得られない可能性が有る。実際に、待機時間を設けた SOM2 では Rb と Ba の破過曲線に違いはなく、 一方で待機時間を設けていない SOM3 では Rb と Ba の破過曲線に違いが確認された。一般には、待機時間を 設けた方が吸着に必要な時間を確保できるため、Rb と Ba の破過曲線の違いは明瞭になると考えられる。 しかし、今回は SOM2 でそのような傾向は確認されていない。従って、待機時間中にトレーサーがボーリン グ孔内に流入していた可能性が考えられる。そして、Rb よりも Ba の方が吸着性が高く、遅延効果は大き いと考えられ、Ba は Rb と比べてバックグラウンドの地下水流れに流されにくい。そのために、SOM2 と SOM3 の Ba の破過曲線は概ね一致したと考えられる。



図 6.4.6-10 待機時間中のトレーサーのボーリング孔への流入

(b) 12MI31D1 (S1T6とS1T7)

S1T6とS1T7は、待機時間以外の試験条件は同じである。保存性トレーサーの破過曲線において(図 6.4.6-4b)、濃度上昇部にそれほど違いはないが、ピーク時の濃度は待機時間を設けたS1T7の方が低かっ た。Rb と Ba の破過曲線(図 6.4.6-6b、図 6.4.6-8b)も同様の傾向を示した。濃度上昇部にそれほど違い がなかったのは、SOM2、SOM3の試験よりもバックグラウンドの動水勾配が大きく、流れの上流側に広がる トレーサー量が少なかったためであると考えられる。バックグラウンドの流れが速いことによって吸着に 必要な時間を充分確保することができないことも関係している可能性もある。

(c) 待機時間の影響への対応方法

チェーサー注入後の待機時間は、吸着や岩石基質への拡散に必要な時間を稼ぐ意味がある。実際に、 Norqvist (2008)が行った単孔式トレーサー試験では、最大で 2.8 時間の待機時間を設けている。以上のこ とから、岩盤の遅延効果を取得するには、なるべく岩盤とトレーサーの接触時間を長くする必要があり、 待機時間が有効な手段になると考える。しかし、今回のように、バックグラウンドの地下水流れによって 上流側に広がったトレーサーがボーリング孔内に流入すれば、正確な破過曲線を得られない可能性がある ことが分かった。この対策としては、チェーサーの量を更に増やす方法が考えられる。しかし、バックグ ラウンドの地下水流れが速い場合、トレーサー回収量が著しく減少する可能性もある。別の対策として、 待機時間中にボーリング孔内に流れ込むトレーサーを、地上との循環によって汲み上げる方法も考えられ る。

6.4.6.3 チューブ分散の評価

トレーサーを回収する際、試験区間内~フラクションコレクター間のチューブ内では分散が生じることが 知られている(以下、チューブ分散と呼ぶ)。トレーサー試験の結果を厳密に評価するには、チューブ分散を 考慮して破過曲線を補正しなければならない。そこで、孔内に設置した蛍光センサーで得たウラニンの破過 曲線(以下、蛍光センサー破過線と呼ぶ)と、地上でサンプリングした結果(ウラニン)に基づく破過曲線 (以下、サンプリング破過曲線)を比較することによって、チューブの分散長を評価することを試みる。

(1) 評価手法

図 6.4.4-5~図 6.4.4-14 に示した蛍光センサー破過曲線から計算されるウラニンの回収量は、地上でサ ンプリングした結果得られた回収量とは明らかに異なる。そこで、蛍光センサー破過曲線とサンプリング 破過曲線は線型関係にあると仮定し、サンプリングで得た回収量と等しくなるように蛍光センサー破過曲 線を補正する(以下、補正蛍光センサー破過曲線と呼ぶ)。次に、その補正蛍光センサー破過曲線を用いて チューブ分散を計算し、チューブの分散長を評価する。

(2) 蛍光センサー破過曲線の補正

蛍光センサー破過曲線に補正係数 ε を一律に乗じて補正蛍光センサー破過曲線を求める。補正係数 ε は、 蛍光センサー破過曲線から求められる回収量と、サンプリングで得た回収量から式(6.4.6-4)によって計 算される。

$$\varepsilon = \frac{Recovery[sampling]}{Recovery[sensor]}$$
(6. 4. 6-4)

Recovery[sampling]:サンプリングによって得られた回収量[mg]、Recovery[sensor]: 蛍光センサー破過曲線から求められる回収量[mg]

図 6.4.6-11 に蛍光センサー破過曲線の補正概念図を、補正手順を以下に述べる。

- ・① 蛍光センサー破過曲線において、トレーサー濃度が0と考えられる時間帯の濃度(バックグランド濃度)の平均値を求める。
- ② 蛍光センサー破過曲線から①で求めたバックグラウンド濃度を一律に差し引き、その破過曲線から回 収量を計算する。
- ③ 式 (6.4.6-4) で計算される補正係数 ε を求める。
- ④ ②で求めた破過曲線に、補正係数 ε を乗じて補正蛍光センサー破過曲線を求める。



時間 [sec]

図 6.4.6-11 補正概念図

(3) チューブ分散の計算方法

チューブ分散については、理論式を用いて計算する。式(6.4.6-5)、(6.4.6-6)に理論式を示す。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - vt}{2\sqrt{\alpha_L vt}}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{L_{tube} - v_{tube}t}{2\sqrt{\alpha_{tube} v_{tube}t}}\right)$$
(6.4.6-5)
$$t \leq 0, \ x \geq 0 \ \text{ictive}, \qquad C = 0$$

$$t > 0, \ x = 0 \ \text{ictive}, \qquad C = C_0$$
(6.4.6-6)
$$t > 0, \ x \to \infty \ \text{ictive}, \qquad C = 0$$

x:距離[m], t:時間[sec], v:流速[m/sec], α_L :縦分散長[m], L_{tube} :チューブ長[m], v_{tube} :チューブ 内の流速[m/sec]

式(6.4.6-5)は、定常流れ場において片端濃度が常に C₀に固定された場合の一次元の理論式である。一 定時間 Δt において片端の濃度が C₀であり、その後濃度が 0 に変化する場合は、重ね合わせ計算により破 過曲線を求める。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{L_{tube} - v_{tube}(t + \Delta t)}{2\sqrt{\alpha_{tube}v_{tube}(t + \Delta t)}} \right\} - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{L_{tube} - v_{tube}t}{2\sqrt{\alpha_{tube}v_{tube}t}} \right)$$
(6. 4. 6-7)

以上に示した理論式を用い、チューブ分散を計算する。各時間帯の濃度平均値を求め、その濃度平均値 を使ってチューブ分散を計算して最後にそれらを合算する。最後に合算した破過曲線とサンプリング破過 曲線を比較し、チューブの分散長を評価する。図 6.4.6-12 にチューブ分散の計算概念図を示す。



Time

図 6.4.6-12 チューブ分散の計算概念図

計算手順を以下に述べる。

① ある時間帯における平均濃度 C_{0n} と時間幅 Δt_n を計算する。

$$C_{0n} = 0.50(C_n - C_{n-1}) \tag{6.4.6-8}$$

$$\Delta t_n = t_n - t_{n-1} \tag{6.4.6-9}$$

② ①で求めた各時間帯の平均濃度 Con について、チューブ分散を計算する。

$$C_n = C_{0n} \{ f(t_{n-1} + \Delta t_n) - f(t_{n-1}) \}$$
(6.4.6-10)

$$\Xi \Xi \mathcal{C}, \qquad f(t) = \frac{1}{2} erfc \left(\frac{L_{tube} - v_{tube} t}{2\sqrt{\alpha_{tube} v_{tube} t}} \right)$$

③ 各時間帯で①、②を計算し、全てを合算する。

図 6.4.6-13 にチューブ分散の計算例を示す。トレーサー注入時間を 100sec、流速を 0.1m/sec、分散長 を 0.1m とし、「移行前」の破過曲線は L_{tube}=40m として計算した破過曲線である。一方、「移行後」の破過

曲線は L_{tube}=100m として計算した結果である。つまり、「移行前」から「移行後」で 60m の距離を移行し、 その間に分散が生じていることを表している。図 6.4.6-13(a)において、「移行前」の破過曲線について前 述した重ね合わせ計算を行った結果、「移行後」の破過曲線と一致している。一方、図 6.4.6-13(b)のよう に「移行前」の破過曲線のタイムステップが不均一な場合、重ね合わせ計算を行うと「移行後」の破過曲 線と違う結果となった。このことから、重ね合わせ計算を行う場合は、タイムステップ幅を均一とする必 要がある。そこで、チューブ分散を計算する際は、蛍光センサー破過曲線のタイムステップ幅を補間によ り1秒毎のデータに修正し、それからチューブ分散を計算する。



図 6.4.6-13 重ね合わせ計算例

(4) デッドボリューム

各試験条件におけるデッドボリュームに関するデータを表 6.4.6-4に示す。30 号孔で行った試験(SOM1、 SOM2、SOM3、SOT8、SOT9、SOT10)は、孔内装置部外に設置した蛍光センサー(C1)で計測しており、デッ ドボリュームは 369~415mL、チューブ長は 29.4~33.06m である。一方、S1T4、S1T5、S1T6、S1T7 は孔内 装置部内に設置した蛍光センサー(C2)で計測を行っており、デッドボリュームは 1044mL、チューブ長は 83.06m である。なお、表 6.4.6-4 内の蛍光センサー~フラクションコレクターまでのデッドボリューム容 量にはポンプの容量 80cc を含めていない。また、表 6.4.6-4 内の平均流速 v_{tube}、レイノルズ数 Re は、式 (6.4.6-11)、(6.4.6-12)を用いて計算する。

$$v_{tube} = Q_p / S_{tube}$$
 (6. 4. 6-11)
 $\text{Re} = \frac{v_{tube} d_{tube}}{v}$ (6. 4. 6-12)

Qp: 揚水流量[m³/sec], S_{tube}: チューブ断面積[m²], d_{tube}: チューブ内径[m], v: 水の動粘性係数[m²/sec]

	揚水流量	デッドボリューム	チューブ長 (オンノサー~FC)	平均流速	Re
	mL/min	mL	m	m/sec	-
S0M1	501	369	29.40	0.66	2831
S0M2	505	369	29.40	0.67	2854
S0M3	(500)	369	29.40	0.66	2827
S0T8	504	415	33.06	0.67	2851
S0T9	100	415	33.06	0.13	563
S0T10	475	415	33.06	0.63	2687
S1T4	113	1044	83.06	0.15	639
S1T5	116	1044	83.06	0.15	656
S1T6	117	1044	83.06	0.15	659
S1T7	118	1044	83.06	0.16	667

表 6.4.6-4 各試験条件におけるデッドボリューム

※FC:フラクションコレクター

(5) 評価結果

a. 蛍光センサー破過曲線の補正結果

各試験条件の蛍光センサー破過曲線に乗じる補正係数 ε について、表 6.4.6-5 に示す。いずれの試験条件も、補正係数 ε が 1 を下回った。

	蛍光センサー破過曲線から計 算される回収量 [mg]	サンプリングで得た回収量 [mg]	補正係数 ε		
S0M1	サンプリン	· ク未実施	-		
S0M2	7.18	3.58	0.50		
S0M3	10.70	5.27	0.49		
S0T8	サンプリン	サンプリング未実施			
S0T9	0.19	0.13	0.70		
S0T10	0.48	0.35	0.72		
S1T4	1.00	0.30	0.30		
S1T5	1.31	0.53	0.40		
S1T6	1.49	0.31	0.21		
S1T7	0.33	0.10	0.31		

表 6.4.6-5 補正係数の計算結果

図 6.4.6-14~図 6.4.6-21 に蛍光センサー破過曲線に補正係数 ε を乗じた結果を示す。ある流れ場にお いて分散が生じると、破過曲線のピーク濃度は低くなり、テール部分が長く伸びて押しつぶされたような 破過曲線となる。従って、補正蛍光センサー破過曲線に比べて、サンプリング破過曲線は押しつぶされた ように変化する。SOM3、SOT9、S1T4、S1T5 については、そういった破過曲線の変化が確認された。一方、 SOM2、S1T6 は、補正蛍光センサー破過曲線よりもサンプリング破過曲線のピーク濃度が高く、上手く補正 できなかった。この要因ついては不明である。また、SOT10 については、短時間で濃度がピーク濃度まで 上昇しており、上手くチューブ分散を計算できない可能性が考えられる。そこで、SOM3、SOT9、S1T4、S1T5 についてチューブ分散を計算し、チューブ分散長を評価する。 b. チューブ分散長の評価結果

SOM3、SOT9、S1T4、S1T5の補正蛍光センサー破過曲線について、チューブ分散を計算する。SOM3につい てはチューブの分散長を1~80m(39通り)、SOT9、S1T4、S1T5についてはチューブの分散長を0.10~20m (48通り)として計算し、チューブ分散を計算した。移行距離(チューブ長)、流速は表 6.4.6-4に記載 した値を用いた。なお、チューブ分散を計算する際は、濃度Cを注入トレーサー濃度C₀で割った比濃度と して計算した。

図 6.4.6-22~図 6.4.6-25 に SOM3、SOT9、S1T4、S1T5 のチューブ分散を計算した結果を示す。いずれも 分散の効果を補正することにより、補正蛍光センサー破過曲線がサンプリング破過曲線の形状に近づくこ とが分かる。但し、チューブ分散後の破過曲線のピーク位置と、サンプリング破過曲線のピーク位置には 大きなずれが生じたままである。これは、チューブ分散を計算する際、揚水流量をチューブ断面積で除し た平均流速を用いたことが考えられる。つまり、実際はチューブの曲り等によって流速は一様でないため、 破過曲線のピーク位置が必ずしも一致しなかった可能性がある。そこで、チューブ分散計算後の破過曲線 と、サンプリング破過曲線の適合性を評価する際は、時間軸についてピーク濃度を示す時間で正規化して 両破過曲線の誤差を計算した。つまり、両破過曲線の横軸を t-t_{peak} として評価する (t_{peak} は濃度がピーク を迎える時間)。

誤差は式(6.4.6-11)で計算した。

Error =
$$\sum_{i=1}^{n} \frac{(X'_i - X_i)^2}{n}$$
 (6.4.6-13)

Error: 誤差、X_i': チューブ分散計算後の濃度、X_i: サンプリング濃度、n: データ数

図 6.4.6-22~図 6.4.6-25 に SOM3、SOT9、S1T4、S1T5 の誤差計算結果と、誤差が最も小さい分散長を用 いた場合の破過曲線を示す。チューブの分散長は、SOM3 で 42m、SOT9 で 1m、S1T4 で 1.5m、S1T5 で 4m と 同定された。S1T5 で濃度上昇部においてやや再現性が悪いが、その他の試験条件は概ねサンプリング破過 曲線と一致した。

SOM3 のチューブ分散長は 42m と他の試験条件と比べてかなり大きい結果となったが、これは乱流の影響 が考えられる。表 6.4.6-4 に示したように、SOM3 のレイノルズ数は約 2830 であるのに対し、SOT9、S1T4、 S1T5 のレイノルズ数は約 560~660 程度である。Nordqvist (2008)は、レイノルズ数が 2000 を超えると乱 流の影響が現われると述べている。また、チューブ長が約 30m であるのに、分散長が 40m となるのは現実 的ではなく、乱流の影響が現われた可能性が高い。但し、同じくレイノルズ数が 2000 を超える SOM2 では、 補正蛍光センサー破過曲線とサンプリング破過曲線にそれほど違いはない。従って、揚水流量が大きいか らといって一律に乱流が生じていたと判断することはできず、今後更なる検討が必要である。SOM3、S1T4、 S1T5 では分散長が 1~4.5m と同定されたが、今回は全ての試験条件で最も小さい 1m の分散長を用いるこ ととした。











図 6.4.6-20 S1T6 蛍光センサー破過曲線補正結果





S1T7 蛍光センサー補正





図 6.4.6-22 SOM3 チューブ分散計算結果



図 6.4.6-24 S1T4 チューブ分散計算結果



図 6.4.6-23 SOT9 チューブ分散計算結果



図 6.4.6-25 S1T5 チューブ分散計算結果

S1T5 チューブ分散計算結果

















6.4.6.4 図解法による回収率の評価

ある流れ場において、揚水を行って回収できる範囲は、透水量係数、割れ目幅、揚水流量、揚水時 間、間隙率によって決まる。つまり、分散の効果が小さいと仮定した場合、保存性トレーサーの回収 率は、透水量係数、割れ目幅、注入流量(時間)、揚水流量(時間)と強い相関があると考えられる。 そこで、一様流中の揚水範囲を理論式によって求め、図解法によって試験で得た回収率となるような パラメーター(割れ目幅、バックグラウンド流れの動水勾配)を評価する。

(1) 理論式

一様流中の揚水範囲の経時変化は、Bear and Jacob(1965)によって示されている。式(6.4.6-14)
 ~(6.4.6-18)にBear and Jacob(1965)が示した理論式を示す。

$$\exp(\bar{x} - \bar{t}) = \cos\bar{y} + \frac{\bar{x}}{\bar{y}}\sin\bar{y}$$
(6.4.6-14)

$$\Xi \Xi \mathfrak{C}, \qquad q_0 = -k_s \frac{\partial h}{\partial s} = -\frac{T_s}{B} \frac{\partial h}{\partial s}$$
(6.4.6-15)

$$\bar{x} = \frac{2\pi q_0 B}{Q} x \tag{6.4.6-16}$$

$$\bar{y} = \frac{2\pi q_0 B}{Q} y \tag{6.4.6-17}$$

$$\bar{t} = \frac{2\pi q_0^2 B}{nQ} t \tag{6.4.6-18}$$

x, y: 直交座標[m]、t:時間[sec]、x, y, t:座標,時間の無次元数[-]、q₀:バックグラウンド
 地下水流れ[m/sec]、k_s:透水係数[m/sec]、T_s:透水量係数、*∂h/∂s*:動水勾配[-]、B:帯水層厚[m]、
 Q: 揚水流量、n:間隙率[-]

式(6.4.6-14)は超越方程式と呼ばれ、単純に計算することはできない。そこで、McElwee(1991) が示した反復解法を用いて解くこととした。図 6.4.6-30 に揚水範囲の計算例を示す。左から右に 向かって一様な流れがある場合、t=1、2、5、10の場合における揚水範囲の経時変化を表している。 時間が経過するに従って、上流側に向かって揚水範囲が広がる様子を再現できている。なお、式 (6.4.6-14)で計算される揚水範囲は y が正の場合のみに限定して適用できるが、バックグラウンド 流れは x 軸方向に平行であるため、y が負の場合における揚水範囲は、y が正の場合の計算結果を x 軸に対して対称移動した。また、注入範囲の経時変化は、式(6.4.6-14)で得られる計算結果を y=0 について対称移動させた.なお、これ以降は帯水層厚 B を割れ目幅 b とし、間隙率は 1.0 として計 算する。

- 6-88 -



図 6.4.6-30 一様流中の揚水範囲の経時変化計算例

(2) 回収率の計算方法

前述した方法で求められた注入範囲と揚水範囲から、回収率を計算する。以下に回収率の計算方法を述べる。

- トレーサー、チェーサーの注入流量、注入時間から、チェーサー注入終了後におけるトレー サーの浸透前線、チェーサーの浸透前線を計算する。
- ② 待機時間を設けた試験条件については、式(6.4.6-15)で計算されるダルシー流速と待機時間から計算される移動距離を求め、①で得たトレーサー浸透前線、チェーサー浸透前線を流れ方向に平行移動する。
- ③ 揚水流量、揚水時間(60分或いは120分)から揚水終了時点における揚水範囲を計算する。
- ④ ①、②で求めたトレーサー、チェーサーの浸透前線と、③で求めた揚水範囲の交点を求め、
 両者が共通する面積を計算し、回収率を求める。

図 6.4.6-31 に本手法による回収率の計算例を示す。(a)は待機時間を設けない場合であり、(b) は待機時間を設けた場合の計算例である。注入流量、注入時間、透水量係数等は S1T6、或いは S1T7 と同じとした。割れ目幅は 0.1mm、バックグラウンド流れの動水勾配は 500%とした。ハッチングさ れた部分が揚水によって回収される回収範囲であり、トレーサー浸透前線とチェーサー浸透前線で 囲まれた面積で除した値を回収率とした。



(a) 回収率計算例(待機時間無し)



(b)回収率計算例(待機時間有り)図 6.4.6-31 図解法による回収率計算例

(4) 評価結果

各試験の回収率計算条件を表 6.4.6-6、表 6.4.6-7 に示す。12MI30D1 で行った試験条件について は、割れ目幅を 0.01~3mm、バックグラウンド流れの動水勾配を 1~500%とし、それぞれの組み合 わせについて合計 3083 ケースについて回収率を計算する。12MI31D1 で行った試験条件については、 割れ目幅を 0.01~3mm、バックグラウンド流れの動水勾配を 1~5000%とし、それぞれの組み合わせ について合計 6047 ケースについて回収率を計算する。

	試験名		S0M1	1 S0M2 S0M3 S0T8 S0T9				S0T10
	対象孔−区間			12MI30 D1				
	注水流量	mL/min	(500)	(500)	(500)	(500)	81	457
	揚水流量	mL/min	501	505	(500)	504	100	475
試験条件	トレーサー注入	min	10	10	10	10	10	10
	チェーサー注入	min	10	10	10	10	10	10
	待機	min	30	20	0	0	0	120
透水	、 量係数	m2/sec		7.46E-07				
揚	水時間	min 60 120 120 120 120				120		
回収率	(ウラニン)	-	21.2%	25.5%	39.3%	6.1%	21.7%	26.3%

表 6.4.6-6 回収率計算条件 (12MI30D1)

試験名			S1T4	S1T5	S1T6	S1T7
	対象孔−区間		12MI31 D1			
	注水流量	mL/min	97	96	98	98
	揚水流量	mL/min	113	116	117	118
試験条件	トレーサー注入	min	20	10	5	5
	チェーサー注入	min	20	5	5	5
	待機	min	0	0	0	30
透水	量係数	m2/sec	2.97E-08			
揚	水時間	min	60	60	60	60
回収率	(ウラニン)	_	8.6%	16.5%	5.9%	2.8%

表 6.4.6-7 回収率計算条件(12MI31D1)

各試験条件における計算結果について、(a)割れ目幅が 0.1~1mm の場合における回収率の計算結 果と、(b)サンプリングで得たウラニンの回収率と今回の計算で得た回収率の差のコンターマップ を図 6.4.6-32~図 6.4.6-41 に示す。(a)は縦軸を回収率、横軸をバックグラウンド流れの動水勾 配とし、割れ目幅が 0.1、0.2、0.5、1.0mm の場合における回収率を示した。また、(a)には、ウラ ニンの回収率も併せて示した。

















S0T10

図 6.4.6-36 SOT9 図解法による回収率評価結果





(b) 実回収率との差

- [Yia

-5 [Cal Rec

-15

-20

3.0

S0T10[Recovery]

500

(b) 実回収率との差

2.5







(a) 割れ目幅が 0.1~1mm の場合における回収率計算結果



いずれの結果も、バックグラウンド流れの動水勾配が大きくなるに従って回収率が低下する様子 を再現できている。表 6.4.6-8 に割れ目幅が 0.1~1.0mm の場合における回収率の評価結果を整理す る。表内には、各区間の透水量係数と本手法によって得られた動水勾配から計算される単位幅当た り流量の最大値、最小値も併せて示す。単位幅当たりの流量は、式(6.4.6-19)から求めた。

 $q = I \times T_s$

(6. 4. 6 - 19)

q: 単位幅当たりの流量[L³/T/L]、I: 図解法によって得られた動水勾配[-]、Ts: 透水量係数[L²/T]

		回収率	動水勾配 [%]		流量 [ml	_/min/m]	
		[%]	割れ目幅 にお	が0.1~1ı ける動水	mmの場合 勾配	最少	最大
S0M1		21.2	32	~	100	143	447
S0M2	~	25.5	35	~	110	156	492
S0M3	1010001	39.3	40	~	120	179	536
S0T8	121013001	16.5	55	~	170	246	760
S0T9	~	5.9	30	~	95	134	425
S0T10		2.8	20	~	50	89	224
S1T4		6.1	570	~	1800	102	321
S1T5	10000101	21.7	740	~	2350	132	419
S1T6		26.3	790	~	2500	141	446
S1T7		8.6	510	~	1600	91	285

表 6.4.6-8 図解法による回収率評価結果まとめ

今回の試験中は、トレーサー試験装置の挿入によって水理場が乱され、自然状態よりも大きな動 水勾配となっていた可能性が考えられた。本手法によって計算されたバックグラウンド流れの動水 勾配も、自然の動水勾配よりも相当大きく、このことからも、試験中に水理場が乱されていた可能 性が高いと考えられる。

また、12MI30D1 と 12MI31D1 で計算された単位幅当たりの流量は、S0T8 を除き概ね一致した。同 じ割れ目を通過する流量は等しいと考えられ、評価結果も同様の傾向を示している。従って、概ね 妥当な結果を得られたといえる。一方、単孔式トレーサー試験の前に行ったポイント希釈試験の結 果では、12MI30D1 における単位幅当たりの流量が 1.96mL/min/m、12MI31D1 では 2.66mL/min/m と評 価された。本手法で評価された流量よりもかなり小さい値となったが、これはポイント希釈試験が ボーリング孔近傍のみを評価するためであると考えられる。 6.4.7 ダイポール試験の評価

ダイポール試験では、各種トレーサー材の回収状態を計測して孔間での物質移行パラメーター値を 得る目的とともに、最適な試験を実施するため以下に示す項目を確認するための試験を実施した。

- ① トレーサーの回収可能性の確認
- ② 注水量が与える影響試験
- ③ 揚水量とトレーサー濃度が与える影響試験
- ④ 同一試験条件における再現性試験

なお、ダイポール試験でのトレーサーの回収率を表 6.4.7-1 に示す。

	試験名		W1T1	W1T2	W1T3	W1T4	W1T5
	注入习 反問		12MI31	12MI31	12MI31	12MI31	12MI31
	注入九 区间		D1	D1	D1	D1	D1
	堤水과 反問		12MI30	12MI30	12MI30	12MI30	12MI30
	物小儿区间		D1	D1	D1	D1	D1
	揚水開始		10:50	14:20	11:06	14:50	11:00
	揚水停止		13:10	16:02	13:16	翌 8:20	16:20
	揚水延べ時間	(min)	140	102	150	1050	320
揚	揚水流量	(mL/min)	1002	508	274	273	197
水	揚水終了時の 揚水中蛍光濃度	(mg/L)	0.002	_	_	_	0.000
	回収した蛍光物質	(mg/L)	0.203	0.011	0.043	0.000	0.011
	11	(mg)	28.5	20.4	1.76	0.859	0.699
	注水開始		10:50	14:20	11:06	14:50	11:00
	注水停止		11:00	14:30	11:16	15:00	13:00
注	注水時間	(min)	10	10	10	10	10
入	注水流量	(mL/min)	122	100	100	50	50
	注入した蛍光物質	(mg/L)	32.3	32.3	3.13	3.13	3.05
	"	(mg)	39.4	32.3	3.13	1.56	1.53
	蛍光物質回収率	(%)	72.3	63.2	56.3	54.9	45.8

表 6	5.4.	7-1	ダイ	ポー	ル試験	\mathbb{P}	レーサー	-回収率
-----	------	-----	----	----	-----	--------------	------	------

	試験名		W1T6	WOT7	WOT8	WOT9	W1T10
	注入孔 区間		12MI31 D1	12MI30 D1	12MI30 D1	12MI30 D1	12MI31 D1
	揚水孔 区間		12MI30 D1	12MI31 D1	12MI31 D1	12MI31 D1	12MI30 D1
	揚水開始		10:30	15:00	10:30	15:50	10:37
	揚水停止		12:30	17:00	13:30	17:30	13:47
	揚水延べ時間	(min)	120	120	180	100	190
揚	揚水流量	(mL/min)	196	97	104	107	298
水	揚水終了時の 揚水中蛍光濃度	(mg/L)	0. 000	0. 005	0. 001	0. 004	0. 000
	回収した蛍光物質	(mg/L)	0. 008	0. 192	0. 045	0. 079	0. 021
	"	(mg)	0. 193	2. 23	0. 844	0. 821	1. 21
	注水開始		10:30	15:00	10:30	15:50	10:37
	注水停止		12:30	17:00	10:40	17:30	13:47
注	注水時間	(min)	10	10	10	10	10
入	注水流量	(mL/min)	20	50	20	20	21
	注入した蛍光物質	(mg/L)	2. 93	30. 5	30. 5	29.8	20.0
	//	(mg)	0. 585	15. 3	6. 10	5.96	4. 19
	蛍光物質回収率	(%)	32. 9	14.6	13. 8	13.8	28.9

表 6.4.7-1(2) ダイポール試験トレーサー回収率

6.4.7.1 トレーサーの回収可能性の確認

ダイポール試験では、初めにトレーサーの回収可能性を調べるため本試験で使用するトレーサー濃度の10倍にあたる30mg/Lのトレーサー溶液を用いてダイポール比を変えた事前試験をW1T1、W1T2、W0T7の3回実施した。各試験条件を表6.4.7-2に、試験結果を図6.4.7-1に示す。

	W1T1	W1T2	WOT7
注入孔-揚水孔	12MI31-12MI30	12MI31-12MI30	12MI30-12MI31
注入量	122mL/min、	100mL/min	50mL/min
注入時間	10 分	10分	10 分
揚水流量	1002mL/min	508mL/min	97mL/min
ダイポール比	8.2	5.1	1.9

表 6.4.7-2 W1T1、W1T2、W0T7 試験条件



図 6.4.7-1 30mg/L のトレーサー溶液を用いてダイポール比を変えた事前試験結果

注入孔を 12MI30 号孔とした試験では、孔内部の蛍光濃度センサーが故障したため、注入時のデー タは欠損している。また、揚水孔における蛍光濃度は計測値限界の 2.6mg/L を超えたため、破過曲線 は平頂化した。

上記3種類の試験結果から、ダイポール比を変化させてもトレーサーを回収できることを確認した。 また、ダイポール比を大きくすることでトレーサーの回収率が上がることを確認した(表 6.4.7-1)。 6.4.7.2 注水量が与える影響試験

注入量の影響を調べるために W1T3 と W1T4 および W1T5 と W1T6 について、各々注入流量以外を同一条件として試験を実施した。各試験条件を表 6.4.7-3 と表 6.4.7-4 に、試験結果を図 6.4.7-2 と図 6.4.7-3 に示す。

図 6.4.7-2、図 6.4.7-3 に示すようにトレーサーの注入量を多くする方が、ダイポール比を大き くするよりも回収時のトレーサー濃度が大きく、濃度がピークに至る時間も早く、更に示トレーサ ーの回収率も上がることを確認した(表 6.4.7-1)。

	W1T3	W1T4
注入孔-揚水孔	12MI31-12MI30	12MI31-12MI30
注入量	100mL/min	50mL/min
注入時間	10 分	10分
揚水流量	274mL/min	273mL/min
ダイポール比	2.7	5.5

表 6.4.7-3 W1T3、W1T4 試験条件



図 6.4.7-2 W1T3 と W1T4 の注入量の差が与える影響試験結果

	W1T5	W1T6
注入孔-揚水孔	12MI31-12MI30	12MI31-12MI30
注入量	50mL/min	20mL/min
注入時間	10 分	10分
揚水流量	197mL/min	196mL/min
ダイポール比	4.0	9.8

表 6.4.7-4 W1T5、W1T6 試験条件



図 6.4.7-3 W1T5 と W1T6 の注入量の差が与える影響試験結果

6.4.7.3 揚水量とトレーサー濃度が与える影響試験

揚水量とトレーサー濃度の影響を調べるために W1T6、W0T8 と W1T10 において揚水流量とトレーサ ー濃度以外を同一条件として試験を実施した。各試験条件を表 6.4.7-5 に、試験結果を図 6.4.7-4 に 示す。

表 6.4.7-5 W1T6、W0T8、W1T10 試験条件

	W1T6	WOT8	W1T10
注入孔-揚水孔	12MI31-12MI30	12MI30-12MI31	12MI31-12MI30
注入量	20mL/min	20mL/min	21mL/min
注入時間	10分	10分	10 分
揚水流量	196mL/min	104mL/min	298mL/min
ダイポール比	9.8	5, 2	14.2



図 6.4.7-4 揚水量とトレーサー濃度が与える影響試験結果

図 6.4.7-4 に示すように注入したトレーサーの濃度比は、ほぼ回収時のトレーサー濃度比となった。揚水流量が多くなる(ダイポール比を大きくする)に従い、回収時のトレーサー濃度がピーク に至る時間が早くなった。また、トレーサーの回収率はダイポール比よりも注入したトレーサーの 濃度によって上がることを確認した(表 6.4.7-1 表 6.4.7-1)。

6.4.7.4 同一試験条件における再現性試験

同一試験条件における再現性を調べるために WOT8 と WOT9 において試験を実施した。各試験条件を 表 6.4.7-6 に、試験結果を図 6.4.7-5 に示す。

	WOT8	WOT9
注入孔-揚水孔	12MI30-12MI31	12MI30-12MI31
注入量	20mL/min	20mL/min
注入時間	10分	10分
揚水流量	104mL/min	107mL/min
ダイポール比	5.2	5.3

表 6.4.7-6 WOT8、WOT9 試験条件



図 6.4.7-5 同一試験条件における再現性試験結果

図 6.4.7-5 に示すようにトレーサーの出現時間は同じで、破過曲線のテール部分で多少の差はある もののほぼ同形状の破過曲線が得られた。また、トレーサーの回収率もほぼ同じ結果となったことか ら(表 6.4.7-1)、同一試験条件であれば試験結果を再現できることが確認できた。

6.4.8 試験装置の適用性確認

6.4.8.1 5MPa 対応高精度圧力計

5MPa 対応高精度圧力計の性能確認には、トレーサー注入時の試験区間(P2) 圧力の経時変化を用いた。データは平成 26 年度に Mensor 製 CPT6000(5MPa)で計測したものと平成 21 年度に Nagra の GTS で Pressure Systems 製 735S-142-0A298.2 (2MPa) で計測したものを用いた。Mensor 製 CPT6000(5MPa) の仕様を表 6.4.8-1 に示す。

図 6.4.8-1 は両圧力計の水圧幅を 0.009MPa に合わせて表示している。図で明らかなように Mensor 製 CPT6000(5MPa)で計測した値は、僅かなポンプの脈動を捉えることもできた。GTS で使用した 735S-142-0A298.2 に比べても約 112 倍の分解能で計測できることを確認した。

レンジ	5MPa
精度	0.020%F.S. (0.001MPa)
分解能	10mg/L(0.00001MPa)
耐圧	150%F.S.
補償温度	15∼45°C
更新速度	50 回/秒
接続	RS-232 or RS-485
最大接続距離	4000feet (RS-485)
ケースサイズ	直径 4.45 cm×高さ 15.24cm
フィッティング	1/4インチ NPT メネジ
電源	6-20VDC、45mA@12VDC

表 6.4.8-1 Mensor 社製 CPT6000 の主な仕様



図 6.4.8-1 5MPa 対応高精度圧力計の出力

6.4.8.2 試験区間形成用パッカー (ピストンパッカー) およびメッシュの性能

試験区間形成用パッカーの性能確認には、試験区間の性状が分りやすいポイント希釈試験における トレーサー置換時の濃度変化を用いた。データは平成 26 年度に実施した D1T2 試験と平成 21 年度に Nagra の GTS で実施した D101 のデータを用いた。各試験条件を表 6.4.8-2 に示す

試験名	D101	D1T2
試験区間形成法	ダブルパッカー	ヒ゜ストンハ゜ッカー+ ナイロンメッシュ
試験区間長	16cm	20cm
試験区間容積	203mL	82mL
循環容積 (試験区間容積を除く)	1227mL	1448mL
循環流量	100mL/min	100mL/min
トレーサー濃度	2mg/L	3mg/L

表 6.4.8-2 D101、D1T2 試験条件

両ポイント希釈試験におけるトレーサー置換時の濃度変化を図 6.4.8-2 に示す。図の中で、D1T2 試 験のトレーサー濃度の立ち上がり形状が良いのは、次に示す六方バルブの効果である。ピストンパッ カーを用いた性能は、トレーサーが試験区間に循環され始めてから、完全に置換されるまでの時間に よって評価する。Nagra の GTS で使用した通常のダブルパッカーでは、試験区間容積 203mL に対して 約 1800mL (100mL/min×18 分)を置換に要した(ただし、その後も影響が出ている)のに対し、ピスト ンパッカーとナイロンメッシュで形成した試験では、試験区間容積 82mL に対して約 300mL (100mL/min ×3 分)で完全に置換することができた。



図 6.4.8-2 試験区間形状の違いによるトレーサー置換時の濃度変化

6.4.8.3 トレーサー注入切換え用六方バルブ

トレーサー注入切換え用六方バルブの性能確認には、トレーサー濃度のレスポンスが分りやすいダ イポール試験におけるトレーサーの濃度変化を用いた。データは平成 26 年度に実施した W1T5 試験と 平成 21 年度に Nagra の GTS で実施した W304 のデータを用いた。各試験条件を表 6.4.8-3 に示す。

試験名	W304	W1T5
試験区間形成法	ダブルパッカー	ヒ゜ストンハ゜ッカー+ナイロンメッシュ
試験区間長	16cm	20cm
試験区間容積	203mL	82mL
トレーサー注入時間	10 分	10分
トレーサー濃度	1mg/L	3mg/L
注水流量	100mL/min	50mL/min
揚水流量	400mL/min	197mL/min
ダイポール比	4.0	4.0

表 6.4.8-3 W304、W1T5 試験条件

両ダイポール試験におけるトレーサー濃度変化を図 6.4.8-3 に示す。図中における時間 0 分とは、 両試験共にトレーサー注入開始時間のことである。先に示した D1T2 試験のトレーサー濃度の立ち上が りに比べ W1T5 の立ち上がり形状がシャープでないのは、トレーサーの注入流速が半分と遅いためであ る。W304 ではトレーサー濃度がピーク濃度に向けて徐々に上昇しているのに対し、試験区間直前に設 置している六方バルブを採用することで、W1T5 ではトレーサー濃度はほぼ矩形波として送ることが可 能となった。また、トレーサーを矩形波状に送ることで、揚水側の濃度もよりシャープに反応するこ とが確認できた。



図 6.4.8-3 六方バルブ使用時のトレーサー注入効果

6.4.8.4 高出力光源装置

GTS で実施した適用性試験ではトレーサー濃度上限を 100mg/L、下限限界値 0.25mg/L としていたが、 蛍光濃度センサーの出力が 4mg/L 以上で不安定となることから、トレーサー濃度の上限を 4mg/L 以下 にする必要が生じていた。しかし、下限限界値が同じままトレーサー濃度の上限を下げることは、今 までの分解能 400(100mg/L/0.25mg/L)に対して、分解能が減ることとなり、微小な変化を捉えること ができなくなってしまう。分解能を増やすためには、下限限界値を下げることが必要であるため、今 回のトレーサー試験では高出力光源を使用した。旧光源と高出力の新光源の仕様を表 6.4.8-4 に示す。

	旧光源	新光源
製造会社	AVANTE S	ファイバーラボ
品名	Avalght-LED470	LED-VR0470-20
出力 (mW)	0.025	8
備考	—	600µm ファイバーに換算

表 6.4.8-4 光源の仕様比較

理論上は、高出力光源を使用することで下限限界値は 1/320 倍低下する。すなわち 0.25mg/L の下 限限界値を 0.01mg/L 以下まで下げることができる。トレーサー濃度上限を 4mg/L としても分解能が 400(4mg/L/0.01mg/L)であれば、トレーサー濃度上限が 100mg/L の場合と同レベルの計測が可能である。 図 6.4.8-4 に旧光源と新光源を用いた蛍光強度の関係を示す。図で分かるように高出力の光源を使用 した場合明らかに蛍光強度が上がり、下限限界値 0.01mg/L まで計測可能となった。しかし、光源の出 力比が 320 倍も向上したにもかかわらずウラニン濃度 0.1mg/L 付近での濃度変化に対する蛍光強度の 変化率は小さな結果となった。これは光ケーブルの接続箇所が多いことで発生したロスによるものと 考える。今後の対策については p.6-112 「6.4.9.4 光ケーブルの」に示す。



図 6.4.8-4 旧光源と新光源を用いた蛍光強度の関係
6.4.9 適用性確認で新たに顕在化した問題点とその対策方針

原位置で適用性試験を実施したことで新たに顕在化した問題点とその対策方針について以下に示す。

6.4.9.1 蛍光トレーサーの混合溶液

今回、蛍光トレーサーとしてウラニンを使用したが、同じ保存性の蛍光トレーサーとしてアミノG酸を同量カクテルして使用した。ウラニンとアミノG酸は共に10000mg/Lで混合したものをトレーサー溶液作成時の原液とした。本来であれば、ウラニンもアミノG酸も単独の10000mg/Lの状態では濁らないが、両方をカクテルするとその溶液は濁り、時間が経過すると瓶の底に沈殿することが確認された(図 6.4.9-1)。この原液をよく撹拌して希釈法により3mg/Lまで薄めた溶液を作成し、その溶液の各濃度を蛍光分光光度計にて計測した結果、ウラニンの濃度は2.6mg/Lとなり、アミノG酸の濃度は3.6mg/Lとなった。

ウラニンとアミノG酸に関しては、混合せずに各々で試験するか、希釈後に濃度を計測する必要が あると考える。ただし、薄い濃度ではこのような濁りが生じる可能性は低いと考える。



図 6.4.9-1 ウラニンとアミノG酸をカクテルした 10000mg/Lの原液

6.4.9.2 トレーサー試験装置の設置

トレーサー試験装置の設置時にいくつかの不具合が生じた。以下に試験装置および設置時の問題に ついて述べる。今回、12MI30 号孔へトレーサー試験装置を設置する際に孔内装置と地上部を連結する チューブ類を孔内装置の深度+10mの 33mで準備をしたが、光ファイバと圧力計用電力信号線がとも に長さ 50mであったため、17mほど長さに差が生じてしまった。このため、蛇腹チューブに収納する 際、17m 分は光ファイバと電力信号線のみで遊びの多い状態となってしまった(12MI31 号孔では、光 ファイバ長にチューブ類の長さを合せて対応した)。

また、今回のサイトはスイス Nagra の GTS とは異なり、光ファイバやチューブを直線で伸ばせるスペースがなくチューブの巻き癖を直すことができない状態で蛇腹チューブにチューブ類をまとめたため、途中で光ファイバの長さと合わず何度か長さの調整が必要となった(図 6.4.9-2)。

このことは、12MI30 号孔に設置した孔内の蛍光濃度センサーで不具合が生じた原因となった可能性 が高いと考える。



図 6.4.9-2 蛇腹チューブに光ファイバ類まとめる作業

作業性の対策としては、坑道内でチューブ類をまとめるのではなく、十分に直線距離がとれる地上 で、チューブ類の曲癖を取り、蛇腹チューブにまとめることが重要となる。

光ファイバの対策としては、光ファイバをステンレスパイプで補強した被覆等で曲げに対して光フ ァイバが折れない構造に変更することが重要と考える。

6.4.9.3 挿入ロッド

ロッドは測定部、孔ロパッカーを設置するための中継部であり、且つ光ファイバやチューブ類を地下水や孔壁から守る保護部品でもある。ロッド内には、蛇腹チューブで保護した以下の配管等を収納した。図 6.4.9-3、図 6.4.9-4 に配管類をロッド内に収納する概念図と写真を示す。



・外形 6mm 電力信号線×1本
・外形 6mm 光ファイバ線×1本
・外形 6mm トレーサー注入用配管×4本
・外形 6mm P1、P3 水圧配管×2本
・外形 4mm 六方バルブ駆動用配管×2本
・外形 4mm パッカー拡張配管×2本
上記の計 12本の配線と配管を内部に収納

図 6.4.9-3 ロッド内に収納する配管類の概念図



図 6.4.9-4 ロッド内の蛇腹チューブとパッカー拡張用チューブ

今回の試験から六方バルブを採用し、過年度で実施した際よりも外形 6mm のチューブ2本と外形 4mm のチューブ2本の計4本が増えた。そのため、蛇腹チューブ内の空間はチューブ類でほぼ満たされ、 蛇腹チューブの可撓性が落ち、ロッド内へ蛇腹チューブを通しづらい状態となった。蛇腹チューブに は中に配管類を入れるための切れ目があり、挿入時の扁平が厳しくなるとこの切れ目が開き、図 6.4.9-5 に示すロッドの接続部の0リングを傷つけた。

	パイプの内側にOリング
内径32.7mm	

図 6.4.9-5 ロッド構造図

ロッドの課題に対しては、太いロッドに変更することが望ましい。現在、間隙水圧モニタリング装置に使用しているロッドの内径は50mmと太く、ロッド間を遮水する0リングが外側にあることと、ロッドホルダー等の付帯工具もそろっていることから、間隙水圧モニタリング装置のロッドを共有のロッドとすることが考えられる。間隙水圧モニタリング装置のロッドの概念図を図 6.4.9-6 に示す。

₽ ¢	カップリング
内径50.5mm	
パイプの外側にロリング	

図 6.4.9-6 間隙水圧モニタリング装置のロッドの概念図

内径 50mm のロッドであれば、光ファイバ、圧力計の電気通信線、トレーサー溶液等の配管用チュ ーブをまとめる蛇腹チューブの径を太いものに変更することができ、その結果、トレーサー試験装置 設置時に光ファイバ等を傷つける可能性は低くなると考える。 6.4.9.4 光ケーブルのコネクター

今年度実施したトレーサー試験では、蛍光濃度センサーVer.3で測定した蛍光強度が想定していた よりも小さく、高出力光源を使用したにもかかわらずウラニン濃度 0.1mg/L以下で付近での濃度変化 率が小さい結果となった。原因は光ファイバの接続点が多かったことが考えられる。Ver2.0と Ver.3 計測時の光ファイバの接続箇所の概念図を図 6.4.9-7 に示す。図に示すように、Ver.3 で用いた光フ ァイバの接続箇所は Ver.2 に比べて倍以上になっていることが分かる。



図 6.4.9-7 Ver.2(12MI30 号孔)と Ver.3(12MI31 号孔)における光ファイバの接続点

蛍光センサーの計測を向上させるためには、図 6.4.9-8 に示すような接続箇所(装置の組み立て方法を考慮)が4カ所となる光ファイバに変更することが必要と考える。



図 6.4.9-8 接続箇所を 4 カ所にした光ファイバの概念図

6.4.9.5 孔内装置の編成

現在のトレーサー試験装置は、試験区間を形成するピストンパッカーと孔ロパッカーの2連パッカー構成で試錐孔内を3区間に分けて水圧を維持する構造としているが、今年度実施した試験の結果、 水圧が十分に維持できていないことを確認した。

トレーサー試験装置での水圧の維持状態を確認するために SOM3 と SOT8 の試験を比較する。

SOM3 と SOT8 の試験条件は同等であるが、SOM3 の試験時は 12MI31 号孔に間隙水圧モニタリング装置が設置されている状態、SOT8 試験時は 12MI31 号孔にトレーサー試験装置が設置されている状態であり、近傍のボーリング孔でのパッカーの区間編成が異なっている(表 6.4.9-1)。

SOM3 試験時		S0T8 試験時		
Int1	23.12~26.0mabh	P1	24.54~26.0mabh	
Int2	21.32~21.93mabh	P2	24.04~24.24mabh	
Int3	16.52~20.12mabh	P3	18.345~23.74mabh	
Int4	7.715~15.32mabh			
Int5	4.68~6.515mabh			

表 6.4.9-1 SOM3、SOT8 試験時の 12MI31 号孔の区間編成

SOM3 のウラニン回収率は 39.3%であるのに対し、SOT8 のウラニン回収率は 16.5%と約 23%減少して いる。また、図 6.4.9-9 に示す通り、蛍光センサーで計測した結果も両試験条件で違いが確認された。 つまり、12MI31 号孔にトレーサー試験装置が挿入されたことによって、異なる破過曲線となり、再現 性が悪くなった可能性がある。



図 6.4.9-9 場の影響試験結果

また、間隙水圧モニタリング装置をトレーサー試験装置に入れ替えることで近傍のボーリング孔との水位差に変化が見られた。

水位差の測定はマノメーターを使って行った。マノメーターによる水位差の測定概要を図 6.4.9-10 に、水位差の測定結果を図 6.4.9-11 に示す。



図 6.4.9-10 マノメーターによる水位差の測定概要



*:9/13 に 12MI30 号孔の間隙水圧モニタリング装置をトレーサー試験装置に入換え **:9/19 に 12MI31 号孔の間隙水圧モニタリング装置についてもトレーサー試験装置に入換え ***:12MI36 号孔を基準とした水位差を示した。



水位差は、全て 12MI36 号孔で測定した水位差を基準として表した。12MI37 号孔は、他孔よりも水 位差がかなり大きく、本装置では測定できていない。12MI30 号孔、12MI31 号孔ともに間隙水圧モニタ リング装置が設置されている状態で測定した時(8/19)は、各孔の水位差はそれほど顕著でない。し かし、12MI30 号孔にトレーサー試験装置が挿入されている状態で測定した場合(9/13~9/18)、12MI30 号孔の水位が更に減少する。また、12MI31 号孔にトレーサー試験装置が挿入された9/19以降は、12MI36 との水位差が 1m 以上となり、更に水位差が大きくなった。これ以降は、更に水位差が大きくなる可能 性があったため計測を中止した。以上のことから、トレーサー試験装置の設置による影響は大きく、 水理場が乱されていた可能性が高い。

試験精度を保つためには、現在2連で編成しているトレーサー試験装置のパッカーの数を増やすこ とが必要と考える。

6.5 トレーサー試験結果の評価解析

6.5.1 単孔注水揚水試験の評価解析

現地の試験条件に基づいてパラメーターを変化させて数値解析を行い、試験結果の破過曲線を再現 するようなパラメーターを同定する。同定パラメーターとしては、割れ目幅、縦分散長、バックグラ ウンド流れの動水勾配、遅延係数とする。評価対象とする試験条件は、12MI30D1において実施した S0M3、 12MI31D1において実施した S1T4、S1T5 とする。

6.5.1.1 数值解析手法

数値解析コードとして、(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(河西ほか(1994)、河西ほか(1995))。FEGMは、空間の離散化については有限要素法を、 時間の離散化については差分法が用いられており、オイラー座標系で記述されている。FEGMにおける 地下水流動に関する基礎方程式は以下の通りである。

$$\left(\theta\beta + \frac{\theta}{\varphi}\alpha + \frac{\partial\theta}{\partial h}\right)\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}V_i + Q = 0$$
(6.5.1-1)

$$\Box \Box \overline{\heartsuit}, \qquad V_i = -k_r K_{ij} \frac{\partial H}{\partial x_j}$$
(6.5.1-2)

 $\theta: 体積含水率[L³/L³]、<math>\beta:$ 流体の修正圧縮係数[1/L]、 $\phi:$ 間隙率[-]、 $\alpha:$ 媒体の修正圧縮係数[1/L]、 h: 圧力水頭[L]、t:時間[T]、 $x_i: 座標[L], V_i: ダルシー流速[L/T], Q: 湧排水率[L³/L³T]、<math>k_r:$ 相 対透水係数[-]、 $K_{ij}:$ 飽和係数テンソル[L/T]、H:全水頭[L]

FEGM における物質移行に関する基礎方程式は、以下の通りである。

$$(\theta + \rho_d K_d) \frac{\partial C}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial t} + \alpha (\theta + \rho_d K_d) \frac{\partial h}{\partial t} \right\} C$$

$$- \frac{\partial}{\partial x_i} \theta D_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} C + \frac{\partial}{\partial x_i} V_i C + M = 0$$
(6. 5. 1-3)

$$\Box \Box \heartsuit, \qquad \theta D_{ij} = \alpha_T \|\mathbf{V}\| \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_i V_j}{\|\mathbf{V}\|} a_m \tau \theta \delta_{ij}$$
(6.5.1-4)

 $\rho_{b}: 媒体のみかけ密度[M/L³]、K_{d}: 分配係数[L³/M]、C: 物質濃度[M/L³]、D_{ij}: 分散係数テンソル[L²/T]、$ $M: 物質のソース[M/T]、<math>\alpha_{T}$: 流れ方向に直交する方向の分散長(横分散長)[L]、 α_{L} : 流れ方向の分 散長(縦分散長)[L]、V: ダルシー流速ベクトル、 δ_{ij} : クロネッカーのデルタ、 a_{m} : 分子拡散係数[L²/T]、 τ : 屈曲率[-]

式(6.5.1-3)に示したように、本解析コードでは、吸着による遅延効果を分配係数として与える。従って、今回の解析では遅延係数を式(6.5.1-5)、(6.5.1-6)を用いて分配係数に変換して与えた。

$$R = 1 + \frac{\rho_d K_d}{\varphi}$$
(6. 5. 1-5)

$$\Leftrightarrow K_d = \frac{\varphi(R-1)}{\rho_d} (6.5.1-6)$$

6.5.1.2 解析モデル

図 6.5.1-1 に本解析で使用する解析モデルを示す。割れ目モデルは、ボーリング孔(直径 86mm)に 相当する部分を除いた半径 30mの円柱形モデルであり、鉛直方向の長さは任意の割れ目幅である。節 点数は 12,096、要素数は 5,976 であり、半径方向の空間分割は 1~50cm である。なお、評価解析を行 う際は、間隙率を共通して 1.0 とする。



図 6.5.1-1 解析モデル

解析は、原位置で行った試験手順に基づき、以下のような手順で行った。

(1) 定常場の設定

トレーサー注入前に、原位置でサンプリングされた地下水を一定流量で注入して定常流速場を設ける。解析モデル外周の節点は固定圧力条件とし、設定する動水勾配となるような圧力を計算して 与える。なお、これ以降の手順においても、共通して固定圧力条件は与える。ボーリング孔周辺に 相当する節点には固定流量条件を与える。なお、物質移行解析は行わず、浸透流解析のみ行う。 (2) トレーサーの注入

(1)から注入流量は変えずにトレーサー注入を行う。ボーリング孔周辺に相当する節点に濃度固 定条件を与え(C=1.0)、物質移行解析の非定常解析を行う。なお、ボーリング孔周辺に相当する節 点は、引き続き固定流量条件とする。

(3) チェーサーの注入

(1)、(2)から引き続き流量は変えずにチェーサーの注入を行う。ボーリング孔周辺に相当する節 点に濃度固定条件を与え(C=0.0)、物質移行解析の非定常解析を行う。なお、ボーリング孔周辺に 相当する節点は、引き続き固定流量条件とする。

(4) 待機時間

注入や揚水を行わず、一定の待機時間を設ける。なお、試験条件によっては待機時間を設けてい ないため、この手順は省く場合もある。

(5) トレーサーの回収

揚水を行ってトレーサーの回収を行う。ボーリング孔周辺に相当する節点に固定流量条件を与え て、物質移行解析(非定常解析)を行う。この時、ボーリング孔周辺に相当する節点の流速を考慮 して各節点の濃度について重み平均を計算し、その値を各時間で整理した結果を破過曲線とする。

6.5.1.3 同定手順

評価解析は、まず始めに保存性トレーサーを用いた試験結果を対象に行い、試験結果を最も良好に 再現する割れ目幅、バックグラウンド流れの動水勾配、縦分散長の組み合わせを求める。その後、求 められた割れ目幅、バックグラウンド流れの動水勾配、縦分散長の組み合わせを用いて、吸着性トレ ーサーを用いた試験結果を対象に評価解析を行い、遅延係数を同定する。評価解析は、保存性トレー サーとしてはウラニン、吸着性トレーサーとしては Rb⁺、Ba²⁺の破過曲線を対象に行う。

図 6.5.1-1 の解析モデルを用いて得られた破過曲線は、チューブ分散を考慮していない。そこで、 0 で述べたチューブ分散の評価手順と同様の方法を用いて解析結果の破過曲線を補正する。デッドボ リューム内の流速やチューブ長は表6.4.6-4に示した値を用い、チューブの分散長は1mとした。また、 先に述べたように、チューブ分散の補正を行う際、揚水流量をチューブ断面積で除した平均流速を用 いた場合破過曲線が時間軸方向にずれ、正確に誤差を評価できない可能性が考えられた。そこで、チ ューブ分散の効果を補正した解析結果と試験結果の誤差を計算する際は、それぞれの濃度がピークを 迎える時間 t_{peak} で時間を正規化し、t-t_{peak} として両破過曲線の誤差を計算した。誤差については式 (6.5.1-7)を用いて計算した。

Error =
$$\sum_{i=1}^{n} \frac{(X'_i - X_i)^2}{n}$$
 (6.5.1-7)

Error: 誤差、X_i': チューブ分散の効果を補正した解析結果、X_i: 試験結果、n: データ数 SOM3、S1T4、S1T5の解析条件を表 6.5.1-1、

表 6.5.1-2 に示す。SOM3 については、保存性トレーサーの試験結果に対し、割れ目幅を 5 通り、縦 分散長を 5 通り、バックグラウンド流れの動水勾配を 8 通りとし、それぞれの組み合わせ(合計 200 通り)について計算を行う。吸着性トレーサーの試験結果に対しては、遅延係数を 29 通りとして計算 を行う。S1T4、S1T5 については、割れ目幅を 8 通り、縦分散長を 8 通り、バックグラウンド流れの動 水勾配を 11 通りとして、それぞれの組み合わせ(合計 396 通り)について計算を行う。吸着性トレー サーの試験結果に対しては、遅延係数を 14 通りとして計算を行う。各試験条件の注入流量、揚水流量、 トレーサー注入時間、チェーサー注入時間については、表 6.4.4-4、表 6.4.4-5 に示した値を用いた。

項目	組み合わせ	値		
割れ目幅	5 通り	0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0mm		
縦分散長				
(横分散長は縦分散長の 1/10 とする)	5 通り	0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0m		
バックグラウンド流れの動水勾配	8通り	2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200%		
合計	200 通り			
遅延係数	29 通り	2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300, 320, 340, 360, 380, 400		

表 6.5.1-1 SOM3 解析条件

表 6.5.1-2 S1T4、S1T5 解析条件

項目	組み合わせ	値		
割れ目幅	6 通り	0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0mm		
縦分散長	ら通り	010205102050		
(横分散長は縦分散長の 1/10 とする)	り通り	0. 1, 0. 2, 0. 3, 1. 0, 2. 0, 5. 0m		
バックグラウンド流れの動水勾配	11 通り	2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000%		
合計	396 通り			
遅延係数	14 通り	2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80, 100		

6.5.1.4 SOM3の評価結果

(1) 保存性トレーサーの評価結果

SOM3 の保存性トレーサーの評価結果について、試験結果との誤差を計算した結果を図 6.5.1-2 に示す。縦軸はバックグラウンド流れの動水勾配、横軸は割れ目幅とし、縦分散長毎のコンターマ ップとして整理した。また、各コンターマップにおいて、最も誤差が小さい位置には星印を示して いる。誤差が最も小さくなったのは、縦分散長が 0.5m、割れ目幅が 0.2mm、バックグラウンド流れ の動水勾配が 50%の解析条件であった。

解析結果の回収率と実回収率との差を図 6.5.1-3 に示す。縦分散長が 0.5m、割れ目幅が 0.2mm、 バックグラウンド流れの動水勾配が 50%の場合における揚水開始から 120 分時点の回収率は 51.2% であり、実回収率 39.3%と比べると、回収率に約 12%の違いがあった。

縦分散長が 0.5m の場合における解析結果と試験結果の破過曲線を図 6.5.1-4 に示す。縦分散長が 0.5m、割れ目幅が 0.2mm、バックグラウンド流れの動水勾配が 50%の場合の解析結果の破過曲線(図 6.5.1-4b)は、濃度上昇部においては概ね一致しているが、テール部でやや違いがあった。

(2) 吸着性トレーサーの評価結果

SOM3 の吸着性トレーサーの評価解析では、保存性トレーサーの評価結果より、縦分散長を 0.5m、 割れ目幅を 0.2mm、バックグラウンド流れの動水勾配を 50%とし、遅延係数を 2~400 として解析を 行った。SOM3 の吸着性トレーサーの評価結果を図 6.5.1-5 に、解析結果の回収率と実回収率の差を 図 6.5.1-6 に、Rb の解析結果の破過曲線を図 6.5.1-7 に、Ba の解析結果の破過曲線を図 6.5.1-8 に示す。

• Rb

試験結果の破過曲線との誤差が最も小さいのは、遅延係数を 20 とした場合の解析結果であっ た。この解析結果の回収率(揚水開始から 120 分)は 87.1%となり、実回収率 59.5%と比べて約 28%の違いがあった。遅延係数を 20 とした場合の解析結果の破過曲線を見て分かるように、保存 性トレーサーの場合と同じく、濃度上昇部は概ね一致するものの、テール部分でやや違いがあっ た。解析結果と試験結果の回収率に違いが生じたのも、テール部分の誤差によるものと考えられ る。

• Ba

Ba については、遅延係数を 400 とした場合であっても誤差が更に小さくなる傾向にあり、誤差 が最少となる遅延係数を同定することはできなかった。しかし、図 6.5.1-8 の試験結果と解析結 果の破過曲線を見ても分かるように、遅延係数を 200 とした場合に濃度上昇部は概ね一致する。 遅延係数が 200 を超えると、ピーク濃度は更に小さくなって濃度上昇部に違いが生じるが、逆に テール部分の誤差が小さくなるため、全体の誤差が小さくなる傾向になると考えられる。以上の ことから、濃度上昇部に着目すると、遅延係数を 200 とした場合に最も試験結果を良好に再現している。

6.5.1.5 S1T5の評価結果

(1) 保存性トレーサーの評価結果

S1T5 の保存性トレーサーの評価結果について、試験結果との誤差を計算した結果を図 6.5.1-9 に示す。縦軸はバックグラウンド流れの動水勾配、横軸は割れ目幅とし、縦分散長毎のコンターマ ップとして整理した。また、各コンターマップにおいて、最も誤差が小さい位置には星印を示して いる。誤差が最も小さくなったのは、縦分散長が 0.5m、割れ目幅が 0.2mm、バックグラウンド流れ の動水勾配が 1000%の解析条件であった。

解析結果の回収率と実回収率の差を図 6.5.1-10 に示す。縦分散長が 0.5m、割れ目幅が 0.2mm、バ ックグラウンド流れの動水勾配が 1000%の解析条件の場合における揚水開始から 60 分時点の回収率 は 29.8%であり、実回収率 21.7%と比べると、回収率に約 8.1%の違いがあった。

縦分散長が 0.5m の場合における破過曲線を図 6.5.1-11 に示す。縦分散長が 0.5m、割れ目幅が 0.2mm、バックグラウンド流れの動水勾配が 1000%の場合の解析結果の破過曲線(図 6.5.1-11b)は、 試験結果の破過曲線を概ね良好に再現していると考えられる。

(2) 吸着性トレーサーの評価結果

S1T5 の吸着性トレーサーの評価解析では、保存性トレーサーの評価結果より、縦分散長を 0.5m、 割れ目幅を 0.2mm、バックグラウンド流れの動水勾配を 1000%とし、遅延係数を 2~100 として解析 を行った。S1T5 の吸着性トレーサーの評価結果を図 6.5.1-12 に、解析結果の回収率と実回収率と の差を図 6.5.1-13 に、Rb の解析結果の破過曲線を図 6.5.1-14 に、Ba の解析結果の破過曲線を図 6.5.1-15 に示す。

• Rb

試験結果と最も誤差が少ないのは、遅延係数を5とした場合の解析結果であった。この解析結 果の回収率(揚水開始から60分)は58.0%であり、実回収率72.3%と比べて約14%の違いがあっ た。破過曲線は、濃度上昇部までは概ね一致するものの、ピーク濃度は試験結果の方が高く、テ ール部分についてもやや誤差が大きい結果となった。

• Ba

試験結果の破過曲線との誤差が最も小さいのは、遅延係数を 10 とした場合の解析結果であったが、誤差が 1.18×10⁻³よりも小さくなることはなく、保存性トレーサーや Rb の評価結果と比べると、やや再現性が悪かった。回収率については、解析結果の回収率が 60.4%であり、実回収率 68.6%との差は約 8.2%であった。

6.5.1.6 S1T6の評価結果

(1) 保存性トレーサーの評価結果

S1T6 の保存性トレーサーの評価結果について、試験結果との誤差を計算した結果を図 6.5.1-16 に示す。縦軸はバックグラウンド流れの動水勾配、横軸は割れ目幅とし、縦分散長毎のコンターマップとして整理した。また、各コンターマップにおいて、最も誤差が小さい位置には星印を示している。誤差が最も小さくなったのは、縦分散長が 0.5m、割れ目幅が 0.2mm、バックグラウンド流れの動水勾配が 1000%の解析条件であった。

解析結果の回収率と実回収率との差を図 6.5.1-17 に示す。縦分散長が 0.5m、割れ目幅が 0.2mm、 バックグラウンド流れの動水勾配が 1000%の解析条件の場合における揚水開始から 60 分時点の回収 率は 38.9%であり、実回収率 26.3%と比べると、回収率に約 12.6%の違いがあった。

縦分散長が 0.5m の場合における破過曲線を図 6.5.1-18 に示す。縦分散長が 0.5m、割れ目幅が 0.2mm、バックグラウンド流れの動水勾配が 1000%の場合の解析結果の破過曲線(図 6.5.1-18b)は、 試験結果の破過曲線を概ね良好に再現していると考えられる。

(2) 吸着性トレーサーの評価結果

S1T6 の吸着性トレーサーの評価解析では、保存性トレーサーの評価結果より、縦分散長を 0.5m、 割れ目幅を 0.2mm、バックグラウンド流れの動水勾配を 1000%とし、遅延係数を 2~100 として解析 を行った。S1T6 の吸着性トレーサーの評価結果を図 6.5.1-19 に、解析結果の回収率と実回収率と の差を図 6.5.1-20 に、Rb の解析結果の破過曲線を図 6.5.1-21 に、Ba の解析結果の破過曲線を図 6.5.1-22 に示す。

• Rb

試験結果と最も誤差が少ないのは、遅延係数を5とした場合の解析結果であった。この解析結 果の回収率(揚水開始から60分後)は63.8%であり、実回収率60.9%と概ね等しい結果が得られ た。破過曲線についても、ピーク時の濃度は試験結果の方がやや高いが、概ね良好に再現してい ると言える。

• Ba

試験結果と最も誤差が少ないのは、遅延係数を 40 とした場合の解析結果であった。この解析 結果の回収率(揚水開始から 60 分後)は 49.4%であり、実回収率 45.4%と概ね等しい結果が得ら れた。破過曲線についても、濃度上昇部でやや違いがあるが、概ね良好に再現していると言える。



図 6.5.1-2 SOM3 保存性トレーサーの評価結果(誤差)

※各コンターマップで最も誤差が小さい位置に星印を示す。



図 6.5.1-3 SOM3 保存性トレーサーの評価結果(回収率)



図 6.5.1-4 SOM3 保存性トレーサーの破過曲線(縦分散長 0.5m)





図 6.5.1-9 S1T5 保存性トレーサーの評価結果(誤差)

※各コンターマップで最も誤差が小さい位置に星印を示す。



図 6.5.1-10 S1T5 保存性トレーサーの評価結果(回収率)



図 6.5.1-11 S1T5 保存性トレーサーの破過曲線(縦分散長 0.5m)





図 6.5.1-16 S1T6 保存性トレーサーの評価結果(誤差)

※各コンターマップで最も誤差が小さい位置に星印を示す。



図 6.5.1-17 S1T6 保存性トレーサーの評価結果(回収率)



図 6.5.1-18 S1T6 保存性トレーサーの破過曲線(縦分散長 0.5m)



6.5.1.7 考察

表 6.5.1-3 に評価解析の結果を整理する。

	試験区間	トレーサー	縦分散長	割れ目幅	バックグラウンド流れ の動水勾配	遅延係数	誤差
S0M3 12M		保存性トレーサー	0.5m	0.2mm	50%	1	2.97E-04
	12MI30D1	Rb				20	4.67E-04
		Ba				200	5.38E-04
S1T5 12M	12MI31D1	保存性トレーサー	0.5m	0.2mm	1000%	1	1.14E-04
		Rb				5	4.53E-04
		Ba				10	1.18E-03
S1T6	12MI31D1	保存性トレーサー	0.5m	0.2mm	1000%	1	9.31E-05
		Rb				5	4.25E-05
		Ba				40	7.70E-05

表 6.5.1-3 評価解析による結果まとめ

(1) 保存性トレーサー

12MI30D1、12MI31D1のいずれにおいても、縦分散長、割れ目幅、バックグラウンド流れの動水勾配は同じ結果が同定された。透水量係数から求められる水理学的開口幅は、12MI30D1 が 0.09mm $(T_s=7.46\times10^{-7}m^2/sec)$ 、12MI31D1 が 0.03mm $(T_s=2.97\times10^{-8}m^2/sec)$ であり、いずれの区間も水理学的開口幅よりも大きい割れ目幅が算定された。

図6.5.1-23に6.4.6.4 節で述べた評価法を用いて回収率を計算した結果を示す。縦軸は回収率、 横軸はバックグラウンド流れの動水勾配であり、評価解析で同定された割れ目幅0.2mmの結果を示 している。各試験で得られた回収率を満たすようなバックグラウンド流れの動水勾配は、評価解析 で得られたバックグラウンド流れの動水勾配と概ね一致した。また、評価解析で同定されたバック グラウンド流れの動水勾配と透水量係数から計算される単位幅当たりの流量は、12MI30D1 では 22.38mL/min/m、12MI31D1 では17.82mL/min/m となり、両区間で概ね等しい値となった。

いずれも自然状態とはいえないようなバックグラウンド流れの動水勾配となったが、これはトレ ーサー試験装置の設置によって水理場が乱されていた影響と考えられる。保存性トレーサーの回収 率は100%に近い方が理想的であり試験結果の信頼性も高い。さらには、岩盤の遅延効果を適切に評 価するためには、岩盤とトレーサーの接触時間がなるべく長くなるようにすることが理想である。 従って、自然状態の水理場をなるべく維持するような対策を考える必要がある。

保存性トレーサーの評価解析では、概ね試験結果を再現することができた。しかし、試験条件に よっては部分的に誤差が大きく、特にテール部分で誤差が大きい場合があった。評価する組み合わ せ(割れ目幅、分散長、バックグラウンド流れの動水勾配)を多くするか、重みを考慮して誤差を 計算するなど、評価方法についても検討しなければならない。

- 6-135 -



図 6.5.1-23 図解法による回収率評価結果(割れ目幅 0.2mm)

(2) 吸着性トレーサー

いずれの試験条件も、Rb よりも Ba の遅延係数の方が大きく同定された。これは、室内試験の結 果と同様の傾向を示している。一方で、12MI30D1 で得られた遅延係数よりも 12MI31D1 で得られた 遅延係数の方が小さく同定された。この原因について一概には言えないが、トレーサーと岩盤の接 触時間が影響している可能性がある。室内試験で算定された遅延係数は更に大きいことから、岩盤 とトレーサーの接触時間を長くすることによって、更に大きい遅延係数が算定される可能性がある。 全体的に保存性トレーサーよりも吸着性トレーサーの方が誤差は大きく、再現性は低下する傾向 にあった。今回は、割れ目だけをモデル化した解析モデルを使ったが、実際は割れ目表面への吸着 や岩石基質における吸着による影響も考えられることから、今回とは違う解析モデルについても検

6.5.1.8 まとめ

討する必要がある。

瑞浪超深地層研究所の換気立坑の深度 300m ボーリング横坑において、異なるボーリング孔で同じ割 れ目と考えられる区間を対象として単孔式トレーサー試験を実施した。今回試験を行った場所では、 バックグラウンドの地下水流れが大きいことが影響し、保存性トレーサーの回収率が最大でも約 40% と低かった。一方で、吸着性トレーサーの回収率は最大で約 70%であった。この原因として、試験孔、 及び試験孔周辺のボーリング孔に設置されたトレーサー試験装置による止水が充分でなかった可能性 が考えられる。つまり、トレーサー試験装置の影響によって水理場が乱され、バックグラウンドの動 水勾配が大きく相当量のトレーサーが流された可能性がある。トレーサーの回収率を改善するには、 なるべく自然状態の水理場を維持する必要があるため、何らかの対策を行う必要があると考えられる。

原位置で行った試験結果のうち、代表する試験条件について割れ目だけをモデル化した解析モデル を用いて評価解析を行って割れ目幅、縦分散長、バックグラウンド流れの動水勾配、遅延係数を同定 した。

- ・ 割れ目幅については、透水量係数から逆算される水理学的開口幅よりも大きな値が求められ た。
- ・ 縦分散長については、0.5mと評価された。
- バックグラウンド流れの動水勾配は、50~1000%と自然状態よりもかなり大きな値が評価されたが、トレーサー試験装置の影響によって、水理場が乱されていた可能性が考えられる。また、一様流中の揚水範囲を理論式によって求め、図解法によって試験で得られた保存性トレーサーの回収率を再現するようなバックグラウンド流れの動水勾配を求めた結果、評価解析と概ね同じ結果となった。
- 遅延係数については、Rb で最大 20、Ba で最大 200 と評価された。この値は室内試験で得られる遅延効果よりも小さな値であり、吸着に充分な時間を確保できなかった可能性が考えられる。今後は吸着に充分な時間を確保するため、待機時間を設ける試験方法について検討する必要がある。

今回は岩石基質を考慮していない割れ目だけを考慮した解析モデルを用いて評価解析を行ったが、 保存性トレーサーよりも吸着性トレーサーの破過曲線に対する再現性が低下する傾向が確認された。 割れ目だけでなく、より現実に近い岩石基質を考慮した解析モデルについても検討する必要がある。 6.5.2 孔間トレーサー試験の評価解析

ここでは、現地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保存性トレーサーδDと 吸着性トレーサーRb⁺、Ba²⁺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。保存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 破過曲線からは分配係数を同定する。

解析には、単孔式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 を用いる。

6.5.2.1 2次元モデルによるバックグラウンド流れの評価

注水や揚水により生じる地下水流れに比べてバックグラウンドの地下水流れが十分に小さい場合 には、保存性トレーサーであるδDの回収率はほぼ100%になることが期待される。そのような場合に は、バックグラウンドの地下水流れを無視して、注水や揚水により生じる地下水流れのみを考慮して 破過曲線の評価解析を行えばよい。しかし、実際にはδDの回収率はW1T5試験では78分後に53.7%、 W0T9 試験では100分後に25.1%であった。そのため、δDの破過曲線の評価解析では、バックグラウ ンドの地下水流れの影響についても考慮することとした。

今回の対象は花崗岩であり、試験時間も短かったため、保存性トレーサーの移行には岩石基質の影響は比較的小さいと考えた。そこで、評価解析を効率的に行うために、まずは割れ目のみを考慮した 2 次元モデルを用いた解析により、バックグラウンドの地下水流れの影響について評価することとした。

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 30 mの正方形とする。

解析に使用した有限要素メッシュを図 6.5.2-1 に示す。正方形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 86 mm で、孔間距離は 3.23 m である。ダイポール試験を解析 対象とするため、注水孔から放射状にトレーサーが分布する可能性が高く、孔を中心とする半径 2 m の円領域を細分化した。全節点数は 40,008、全要素数は 39,925 である。

前述したポイント希釈試験の結果によれば、対象割れ目の単位幅あたりのバックグラウンドの地下 水流量は12MI30 号孔で1.96 ml/min/m、12MI31 号孔では2.66 ml/min/m であった。孔間トレーサー試 験では両孔の試験区間どうしの距離は3.23 m であり、この間のバックグラウンドの地下水流量はこれ らの値とは異なる可能性があるが、解析の初期値としてこれらの数値の幾何平均である2.28 ml/min/m を使用することとした。

また、透水試験の結果によれば、透水量係数は 12MI30 号孔の試験区間で 2.91×10⁻⁵ m²/sec、12MI31 号孔の試験区間で 8.88×10⁻⁷ m²/sec であり、これらの幾何平均は 5.08×10⁻⁶ m²/sec である。透水量 係数が割れ目の開口幅の 3 乗に比例するといういわゆる 3 乗則によれば、この透水量係数の幾何平均

-6-138 -

に対応する割れ目の開口幅は 0.184 mm であり、解析の初期値としてはこの開口幅を使用することとした。

また、Gelhar (1992)の文献を基に、孔間距離 3.23 mの 1/10 である 0.323 mを縦分散長の初期値とし、さらにその 1/10 の 0.0323 mを横分散長の初期値とした。

割れ目の開口幅を 0.184 mm、割れ目内の縦分散長を 0.323 m、横分散長を 0.0323 m、バックグラウ ンドの地下水流量を 2.28 ml/min/m として、W1T5 試験と W0T9 試験の δD の破過曲線を計算した。ただ し、ポイント希釈試験の結果からはバックグラウンドの地下水流れはわからないため、バックグラウ ンドの地下水流れが 12MI31 号孔から 12MI30 号孔へ向かう場合、その逆方向の場合、両孔を結ぶ線分 に直交する場合の3通りについて計算を行った。その結果得られた揚水孔での回収率を図6.5.2-2と 図 6.5.2-3 に示す。なお、実際の試験では δD の濃度は、揚水孔内の試験区間ではなく、揚水孔から 送水チューブや揚水ポンプを経由してフラクションコレクターで採取された水を分析して得られる。 W1T5 試験では送水チューブと揚水ポンプの総容量は 843 mL であり、揚水流量は 194.9 mL/min である ため、揚水孔内とフラクションコレクターとの時間差は 4.33 分となる。一方、W0T9 試験では送水チ ューブと揚水ポンプの総容量は1057 mL であり、揚水流量は106.6 mL/min であるため、揚水孔内とフ ラクションコレクターとの時間差は 9.91 分となる。したがって、δDの揚水孔内での回収率の実測値 は、W1T5 試験では 73.76 分で 53.7 %、W0T9 試験では 90.17 分で 25.1 %ということになる。なお、室 内試験の結果では、送水チューブ内での分散はほとんど無視できる。図 6.5.2-2 と図 6.5.2-3 を見る と、W1T5 試験、W0T9 試験のいずれのバックグラウンド流れの方向での回収率も実測値を上回っている。 バックグラウンドの地下水流れの方向が 12MI31 号孔から 12MI30 号孔に向かう方向に近い場合、地下 水流量が 2.28 ml/min/m より大きいとして計算すると W1T5 試験の回収率はさらに大きくなり、2.28 ml/min/m より小さいとして計算すると WOT9 試験の回収率が大きくなる。逆に、バックグラウンドの 地下水流れの方向が 12MI30 号孔から 12MI31 号孔に向かう方向に近い場合、地下水流量が 2.28 ml/min/m より大きいとして計算すると WOT9 試験の回収率が大きくなり、2.28 ml/min/m より小さいと して計算すると W1T5 試験の回収率が大きくなる。一方、バックグラウンドの地下水流れの方向が 12MI30 号孔と 12MI31 号孔を結ぶ線分に直交する方向に近い場合、地下水流量が 2.28 ml/min/m より 大きいとして計算すると W1T5 試験、W0T9 試験のいずれの回収率も小さくなり、地下水流量が 2.28 ml/min/mより小さいとして計算するとWIT5 試験、WOT9 試験のいずれの回収率も大きくなる。そのた め、バックグラウンドの地下水流れの方向は 12MI30 号孔と 12MI31 号孔を結ぶ線分に直交する方向に 近く、バックグラウンドの地下水流量は 2.28 ml/min/m よりも大きいと考えられる。

そこで、バックグラウンドの地下水流れの方向が 12MI30 号孔と 12MI31 号孔を結ぶ線分に直交し、 地下水流量を 2.28 ml/min/m の 2~6 倍に増やした計算を実施した。その結果得られた回収率を図 6.5.2-4 と図 6.5.2-5 に示す。W1T5 試験では、バックグラウンドの地下水流量を 2.28 ml/min/m の 5

- 6-139 -

倍にした場合に、73.76分後の回収率が実測値に最も近い60.3%となった。一方、WOT9 試験では、バックグラウンドの地下水流量を2.28 ml/min/mの4倍にした場合に、90.17分後の回収率が実測値に 最も近い20.7%となった。

そこで、バックグラウンドの地下水流量を 2.28 ml/min/m の 4 倍あるいは 5 倍にし、バックグラウ ンドの地下水流れの方向を 12MI30 号孔と 12MI31 号孔を結ぶ線分に直交する方向から若干ずらした計 算を行い、W1T5 試験と W0T9 試験の両方とも回収率が実測値に近くなるケースを探査した。その際に、 揚水孔の破過曲線が実測値に近くなるように、割れ目の開口幅と分散長も変更した。ただし、縦分散 長と横分散長の比は 10:1 に固定した。その結果、図 6.5.2-6 と図 6.5.2-7 に示すように、バックグラ ウンドの地下水流量を 2.28 ml/min/m の 5 倍にし、バックグラウンドの地下水流れの方向を 12MI30 号孔から 12MI31 号孔に向かう方向に対し時計回りに 75 度回転させた方向とした場合に、W1T5 試験の 回収率は 53.9 %、W0T9 試験の回収率は 21.2 %とほぼ実測値に一致した。



解析領域中心部拡大

注水孔付近拡大



解析領域全体

図 6.5.2-1 解析モデル(保存性トレーサーを用いた孔間試験)



図 6.5.2-2 バックグラウンドの地下水流れの方向と回収率(W1T5 試験)



図 6.5.2-3 バックグラウンドの地下水流れの方向と回収率(WOT9 試験)



図 6.5.2-4 バックグラウンドの地下水流量と回収率(W1T5 試験)



図 6.5.2-5 バックグラウンドの地下水流量と回収率(WOT9 試験)



図 6.5.2-6 推定されたバックグラウンドの地下水流れの下での回収率(W1T5 試験)



図 6.5.2-7 推定されたバックグラウンドの地下水流れの下での回収率(WOT9 試験)

6.5.2.2 3 次元モデルによる移行パラメーターの評価解析

6.5.2.1 で推定したバックグラウンドの地下水流れを前提として、孔間トレーサー試験の破過曲線の評価解析を実施する。すべてのトレーサーを使用した孔間トレーサー試験は W1T5 試験と W0T9 試験 であるが、W0T9 試験は、回収率が低く、Rb⁺では揚水孔での濃度のピーク値付近でのばらつきが大き く、Ba²+にいたっては濃度がバックグラウンド程度しかなく有意な破過曲線が得られていないと判断 された。そのため、ここではより回収率の高い W1T5 試験についてのみ評価解析を行うこととした。

解析では、一様な開口幅の単一割れ目に加えて周囲の岩石基質を考慮した。解析に使用した有限要素メッシュを図 6.5.2-8 に示す。考慮する割れ目の大きさは一辺の長さ 30 m の正方形で、正方形の中心付近に 12MI30 号孔と 12MI31 号孔を配置した。ボーリング孔の直径は 86 mm である。孔間距離は 3.23 m である。解析を効率的に行うために、相対する割れ目面の中心を対称面として、その片側のみを考慮する 1/2 モデルとする。割れ目は、板状要素でモデル化するため幾何学的厚みはゼロだが、物性値の厚みをもつ。岩石基質は 7 層のヘキサ要素でモデル化するが、図 6.5.2-9 に示すように、要素の厚さは核種の吸着性に応じて変更した。板状要素数は 39,925、ヘキサ要素数は 279,475 (39,925×7)、全要素数は 319,400 で、全節点数は 320,064 である。

岩石基質の間隙率と真密度は、國丸他(2012)の水飽和法による割れ目面近傍の数値から、それぞれ 0.0105(=1.05%)と 2.65 g/cm³と設定した。岩石基質の実効拡散係数も、同様に國丸他(2011)の Cs や Sr の割れ目面近傍の数値と各核種の水中での拡散係数を考慮して、 δD で 1.48×10⁻¹² m²/sec、Rb⁺ で 1.59×10⁻¹² m²/sec、Ba²⁺で 1.15×10⁻¹² m²/sec と設定した。

まず、割れ目の開口幅と縦分散長をパラメーターとして、保存性トレーサー δD の破過曲線のフィ ッティングを行った。その際、横分散長については、縦分散長の 1/10 とした。割れ目の開口幅を 0.054 mm、縦分散長を 0.02 m とした時に、破過曲線は最もよく実測値と一致した。図 6.5.2-10 に、破過曲 線の最適なフィッティングの結果を実測値と併せて示す。破過曲線の立ち上がりの部分ではやや計算 値の方が先行しているが、ピーク値やテールの部分等、全体的には実測値を良く再現できている。前 述したように、対象割れ目の 12MI30 号孔と 12MI31 号での透水量係数の幾何平均は 5.08×10⁻⁶ m²/sec であり、いわゆる 3 乗則によればこの透水量係数に対応する割れ目の開口幅は 0.184 mm となるが、今 回の同定値はその約 30%であった。一方、高精度 BTV による孔壁観察では、試験対象割れ目の開口幅 は 12MI30 号孔では平均 0.05 mm、12MI31 号孔では平均 0.06 mm となっており、今回の同定値とほぼー 致している。縦分散長については、孔間距離 3.23 m の 0.6%とかなり小さい値となっている。これは、 トレーサーが割れ目内の特定のチャンネルを選択的に流れていることを示唆している。ただし、國丸 他 (2012)による実効拡散係数の数値は、Cs で 1.10×10⁻¹² ~2.57×10⁻¹² m²/sec、Sr で 7.11×10⁻¹³ ~1.46 ×10⁻¹² m²/sec とばらついており、評価解析で岩石基質の実効拡散係数をどのような数値に設定するか により、同定される縦分散長の数値は変わってくる。

- 6-144 -
続いて、保存性トレーサーδDの破過曲線のフィッティングで得られた割れ目の開口幅と縦分散長 を既知とし、分配係数のみをパラメーターとして、吸着性トレーサーRb⁺と Ba²⁺の破過曲線のフィッテ ィングを行った。分配係数を Rb⁺では 3.66 mL/g、Ba²⁺では 19.9 mL/g とした時に、それぞれの破過曲 線は最もよく実測値と一致した。図 6.5.2-11 と図 6.5.2-12 に、Rb⁺と Ba²⁺のそれぞれの破過曲線の最 適なフィッティングの結果を実測値と併せて示す。Rb⁺では、破過曲線の立ち上がりの部分では実測値 よりもやや遅れているが、ピーク値やテールの部分等、全体的には実測値を良く再現できている。Ba²⁺ では、破過曲線のテールの部分で実測値をやや下回っているが、ピーク値や立ち上がりの部分等、全 体的にはやはり実測値を良く再現できている。2章に述べた室内試験において、Rb⁺の分配係数は、粉 末状試料を用いたバッチ吸着試験では Rb⁺で 2.6~3.0 mL/g、Ba²⁺で 10.0~12.0 mL/g、ディスク状試 料を用いたバッチ吸着試験では Rb⁺で 0.8~0.9 mL/g、Ba²⁺で 2.0~2.5 mL/g であった。孔間トレーサ ー試験の破過曲線から同定された分配係数は、粉末状試料を用いたバッチ吸着試験をやや上回る値と なっている。室内試験の分配係数は、健岩部を試料とし、吸着がほぼ平衡に達した静的な状態で算出 した数値である。一方、孔間トレーサー試験では、割れ目およびその近傍の岩石基質を対象とし、そ の割れ目には緑泥石や方解石の充填も見られ、試験時間が短く動的な状態で算出した数値である。こ れらの違いが、孔間トレーサー試験と室内試験から得られた分配係数の差異の原因と考えられるが、 今後より詳細に検討していきたい。



全体図

ボーリング孔付近拡大図







Rb⁺解析用



Ba²⁺解析用

図 6.5.2-9 トレーサーによる岩石基質メッシュ厚さの違い



図 6.5.2-10 3 次元モデルによる重水の破過曲線のフィッティング(W1T5 試験)



図 6.5.2-11 3 次元モデルによる Rb⁺の破過曲線のフィッティング(W1T5 試験)



図 6.5.2-12 3 次元モデルによる Ba²⁺の破過曲線のフィッティング(W1T5 試験)

6.5.2.3 まとめ

原位置孔間トレーサー試験により得られた揚水孔側での保存性トレーサーδDと吸着性トレーサー Rb⁺、Ba²⁺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の同定を試みた。

今回の試験では保存性トレーサー δ D の回収率が低く、バックグラウンドの地下水流れによる影響 が無視できないと判断された。そのため、まず、割れ目のみを考慮した 2 次元モデルを用いて、 δ D の回収率からバックグラウンドの地下水流れについて推定することとした。その結果、バックグラウ ンドの地下水流量は 2 つの試験孔でのポイント希釈試験から得られた流量の幾何平均の 5 倍で、流れ の方向は 12MI30 号孔から 12MI31 号孔に向かう方向に対し時計回りに 75 度回転した方向であると推定 された。孔間距離が 3.23 m と長いため、孔間での平均的なバックグラウンドの地下水流量が各試験孔 でのポイント希釈試験で得られた流量と異なること自体は不思議ではない。しかし、試験対象割れ目 の透水量係数は 2 つの試験孔で大きく異なるにもかかわらず、ポイント希釈試験ではほぼ同程度の地 下水流量が得られており、5 倍も大きな地下水流量が推定されたことはやや奇異な結果である。

推定されたバックグラウンドの地下水流れを既知として、孔間トレーサー試験の破過曲線の評価解 析を行った。解析は、すべてのトレーサーを使用した孔間トレーサー試験のうち、比較的回収率の高 い W1T5 試験を対象とした。解析には、一様な開口幅の単一割れ目に加えて周囲の岩石基質を考慮した 3 次元モデルを用いた。保存性トレーサー δDの破過曲線へのフィッティングを試みたところ、割れ目 の開口幅を 0.054 mm、縦分散長を 0.02 m (横分散長は縦分散長の 1/10 と仮定)とした時に、破過曲 線は最もよく実測値と一致した。同定された割れ目開口幅は、透水量係数からいわゆる 3 乗則により 求めた開口幅の約 30 %であったが、高精度 BTV を用いた孔壁観察による開口幅とほぼ一致していた。 縦分散長は孔間距離の 0.6 %とかなり小さく、トレーサーが割れ目内の特定のチャンネルを選択的に 流れたことを示唆している。ただし、解析で用いた実効拡散係数の設定根拠となった文献の実効拡散 係数の数値にはばらつきがあり、岩石基質の実効拡散係数をどのような数値に設定するかにより、同 定される縦分散長の数値は変わってくる。

続いて、割れ目の開口幅と縦分散長を既知とし、分配係数のみをパラメーターとして吸着性トレー サーRb⁺とBa²⁺の破過曲線のフィッティングを試みた。分配係数をRb⁺では3.66 mL/g、Ba²⁺では19.9 mL/g とした時に、それぞれの破過曲線は最もよく実測値と一致した。同定された分配係数は、2 章に述べ た粉末状試料を用いたバッチ吸着試験による数値をやや上回る値であった。室内試験の分配係数は、 健岩部を試料とし、吸着がほぼ平衡に達した静的な状態で算出した数値であった。一方、孔間トレー サー試験では、割れ目およびその近傍の岩石基質を対象とし、その割れ目には緑泥石や方解石の充填 も見られ、試験時間が短く動的な状態で算出した数値である。これらの違いが、孔間トレーサー試験 と室内試験から得られた分配係数の差異の原因と考えられるが、今後より詳細に検討していきたい。

- 6-148 -

6.6 まとめと今後の課題

6.6.1 トレーサー試験の原位置適用性試験

国内におけるトレーサー試験装置の適用性試験として、JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300mボー リング横坑に掘削された 12MI30 号孔、12MI31 号孔の 2 孔を対象に、単孔式トレーサー試験としてポ イント希釈試験と単孔式注水揚水試験を、孔間トレーサー試験としてダイポール試験を実施した。

(1) ポイント希釈試験

ポイント希釈試験は DOM1 (12MI30 号孔の 24.46~24.66mabh 区間) と D1T2 (12MI31 号孔の 24.04 ~24.24mabh 区間) の 2 点で実施した。試験の結果、各試験孔における地下水の自然通過流量として、

• DOM1 : 1.86 mL/min

• D1T2 : 2.55 mL/min

が得られた。2点の試験区間は間隙水圧の応答から連続している割れ目ではあるものの、透水量係数が大きく湧水量も多い12MI30号孔より12MI31号孔の試験区間の方がわずかではあるが自然通過流量が大きかった。

(2) 単孔式注水揚水試験

12MI30 号孔および 12MI31 号孔で実施した単孔式注水揚水試験から、以下の特性が得られた。

- SOM1 と SOT8 は試験条件が同じであっても回収率に約 5%の違いがあった。
- トレーサーの回収率は概ね注入量と揚水量の体積比(V_{pump}/V_{inj})が大きくなるに従って大きくなる傾向にあるが、待機時間を設けた際に保存性トレーサーの回収率はこの傾向を示さなかった。
- 破過曲線から回収率の経時変化を見ると、待機時間を設けた方が吸着に必要な時間を確保で きるため Rb と Ba の破過曲線の違いは明瞭になると考えられるが、今回は全く逆の傾向が確認 された。
- これらのことからバックグラウンド流れが大きいく評価解析において無視できないものと考える。
- (3) ダイポール試験結果

12MI30 号孔の 24.46~24.66mabh 区間と 12MI31 号孔の 24.04~24.24mabh 区間において試験条件 を変えた 10 種類のダイポール試験から以下の特性が得られた。

- トレーサーの注入量を多くする方が、ダイポール比を大きくするよりも回収時のトレーサー 濃度ピークにおける濃度も高くピーク至るまでの時間も早い。またトレーサーの回収率も上げ ることができる。
- ・ ダイポール比を大きくすると、回収時のトレーサー濃度ピークの時間が早くなる。

6.6.2 トレーサー試験装置の適用性確認

平成 23 年度以降、トレーサー試験装置の新たに改良した項目について、原位置での適用性確認を 行った。

(1) 5MPa 対応高精度圧力計

高精度圧力計の使用によって圧力計測の精度と分解能が向上し、僅かなポンプの脈動の圧力変化 も捉えることが確認できた。

(2) 試験区間形成用パッカー(ピストンパッカー)およびメッシュの性能

ピストンパッカーとナイロンメッシュで形成した試験区間は、透水性に影響を与えることなしに 試験区間容積を少なくでき、また、トレーサー溶液を短時間に完全置換する性能を示した。

(3) トレーサー注入切換え用六方バルブ

六方バルブによりトレーサー濃度は、ほぼ矩形波に送ることが可能となった。

(4) 高出力光源装置

高出力光源の使用によって、トレーサー濃度の 0.01ppm まで計測可能となった。しかし、想定よ りも蛍光強度が上がらなかったことから、光ケーブルの接続箇所が多いことでロスが発生している 可能性があると考える。

(5) トレーサー試験装置の設置時の確認事項

トレーサー試験装置の漏水を防止するための確認事項として、現場で耐圧検査ができる機材を用 いて、新規部品および現地でしか組み合わせ確認できない箇所は、装置を孔内に設置する前に現地 で事前検査を実施する。

6.6.3 適用性確認で新たに顕在化した問題点とその対策

今年度の適用性試験の結果、新たに顕在化した問題点とその対策について以下に示す。

(1) トレーサー溶液

今回、蛍光トレーサーとしてウラニンとアミノG酸の同量を混合して使用した。その結果、時間 が経過すると原液に濁度が生じ、ビンの底に沈殿が起こることが確認された。このことから、ウラ ニンとアミノG酸に関しては、混合せずに各々で試験するか、希釈後に濃度を計測する必要がある と考える。ただし、薄い濃度ではこのような濁りが生じる可能性は低いと考える。

(2) トレーサー試験装置の設置

12MI30 号孔に設置した孔内の蛍光濃度センサーに不具合が生じた。これは、装置に用いるチュー ブ類が多く、作業性が悪いことから、光ケーブルを傷つけてしまったため起こったと考える。作業 性の向上のため、作業手順の見直しや光ケーブルの保護について検討が必要と考える。

(3) 挿入ロッド

トレーサー試験装置に六方バルブを追加したことで、ロッド内に通すチューブ類が多くなった。 現状では、チューブ類とロッドのクリアランスがほとんどなく、作業効率を悪化させるとともに、 漏水等のリスクが高くなっていると考える。今後は内径の大きなロッドを用いる等の対策が必要と 考える。

(4) 光ケーブルの接続箇所

光ケーブルの接続箇所が多いことで蛍光強度にロスが発生している可能性があると考える。光ケ ーブルの接続箇所を減らす改良が必要と考える。

(5) 孔内装置の編成

現在、トレーサー試験装置は2連のパッカーで構成されており、ボーリング孔内を3つの区間を 形成し水圧を維持している。しかし今回の試験場では、割れ目が複数の水理的連続性を持っている ことから2連のパッカーでは自然状態に近い水圧を保持することが出来なかったと考える。試験精 度を保つためには、パッカーの数を増やす等、トレーサー試験装置の編成について改めて検討する 必要があると考える。

6.6.4 トレーサー試験結果の評価解析

原位置で行ったトレーサー試験のうち、代表的な試験結果について数値計算による評価解析を行っ た。一様な開口幅を有する単一の割れ目を仮定して、単孔式トレーサー試験に対しては割れ目のみを 表現したモデル、孔間トレーサー試験に対しては割れ目に加えて周辺の岩石基質も表現したモデルを 用いてそれぞれ解析を行った。保存性トレーサーの試験結果からは、割れ目の開口幅と分散長を評価 した。今回の試験では回収率が低く、バックグラウンド(自然状態)の地下水流れの影響が無視でき ないと考えられたため、保存性トレーサーの試験結果の評価ではバックグラウンドの地下水流れの評 価も併せて行った。一方、収着性トレーサーの試験結果からは、岩石基質に対する分配係数(単孔式 では割れ目のみをモデル化しているため遅延係数)を評価した。

保存性トレーサーについて、単孔式トレーサー試験の評価では、12MI30 号孔の試験から1つ、12MI31 号孔の試験から2つ、計3つの試験を抽出し評価を行ったが、いずれの試験でも同一の割れ目の開口 幅と分散長と同定された。ただし、孔間トレーサー試験の評価で同定された数値とは、開口幅、分散 長ともに大きく異なる値であった。今回の孔間トレーサー試験では孔間距離が3.23 mと離れており、 試験孔近傍の値を代表する単孔式トレーサー試験と同定値が異なったとも考えられるが、単孔式トレ ーサー試験の評価解析では岩石基質への拡散を考慮していないために、孔間試験よりも長い分散長、 大きな開口幅が得られた可能性がある。今後は、単孔式トレーサー試験についても岩石基質への拡散 も考慮した解析を行うこととしたい。また、バックグラウンドの地下水流れについて、単孔式、孔間 いずれのトレーサー試験の評価でも、ポイント希釈試験で得られた流量よりも大きいものと推定され た。このバックグラウンドの地下水流量の不整合の理由についても、ポイント希釈試験の結果の妥当 性を含めて今後検討していきたい。

収着性トレーサーについて、単孔式トレーサー試験では遅延係数、孔間トレーサー試験では分配係 数を同定した。単孔式トレーサー試験の結果からは Rb⁺に比べて Ba²⁺の遅延係数が 2~10 倍、孔間トレ ーサー試験の結果からは Rb⁺に比べて Ba²⁺の分配係数が 5.4 倍大きいという結果が得られた。孔間トレ ーサー試験から同定された分配係数は、粉末状試料を用いた室内でのバッチ吸着試験をやや上回る値 となっている。室内試験の分配係数は、健岩部を試料とし、吸着がほぼ平衡に達した静的な状態で算 出した数値である。一方、孔間トレーサー試験では、割れ目およびその近傍の岩石基質を対象とし、 その割れ目には緑泥石や方解石の充填も見られ、試験時間が短く動的な状態で算出した数値である。 これらの違いが、孔間トレーサー試験と室内試験から得られた分配係数の差異の原因と考えられるが、 今後より詳細に検討していきたい。

- 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., Welty, C. and Rehfeldt, K.R. (1992): A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. Water Resour. Res., Vol. 28, No. 7, 1995–1974.
- McElwee, C.D. (1991): Capture Zones for simple aquifers, GroundWater -Computer Notes-, Vol. 29, No. 4, pp. 587-590.
- Nordqvist, R., Geosigma, AB(2008): Evaluation and modeling of SWIW tests performed within the SKB site characterization programme, SKB Report R-08-104.

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):花崗岩花崗岩試料を用いた収着・拡散試験および間隙率測定, 地層 処分研究開発部門, 東濃地科学研究ユニット, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2012-013.

7. 天然トレーサーを利用した調査技術の開発

7.1 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、数万年~百万年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・評価技術になり得ると考え られる。

精密調査段階においては、地下調査施設の建設が開始され、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有す ること、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存在する場合には、主要な核種の漏洩経路となり得るためである。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 経路になり得るかどうかを確認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、地下水年代測定技術は、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、比較的狭い範囲において人工トレ 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、人工的な試験だけでは、 広域的な地下水流動・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っていく必要がある。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、坑道など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。

7.2 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、 天然トレーサーによる調査、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。さらに、 これらの経時的な変化を評価し、新しい地下水の流入を評価する。あわせて研究坑道周辺を対象とし た地下水流動・物質移行解析を行い、実測値と比較することにより、地下水流動モデルの妥当性を検 討する。

天然トレーサーによる調査では、従来の地下水年代測定技術を精密調査において実施するための技 術開発、坑道において希ガス試料を採取する方法、流れが速い地下水の指標となる物質、流れが遅い 地下水の指標となる物質を調査する。

7.3 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。

7.3.1 瑞浪における地下水調査

7.3.1.1 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 7.3.1-1 を対象に地下水 調査を実施した。調査地点および区間は以下の通りである。

- ・ 深度 300m ボーリング横坑: 13MI37 孔 区間 1, 2, 3, 4 (区間編成を図 7.3.1-2 に示す。)
- ・ 深度 300 m 研究アクセス坑道: 09MI20 号孔区間 1, 2, 3
- · 深度 200 m ステージ: 07MI07 号孔区間 1, 3, 5 (200-1, 3, 5)
- 深度 300 m ステージ: 09MI20 号孔区間 1, 3, 5 (300-1, 3, 5)
- 深度 400 m ステージ: 10MI26 号孔区間 1, 3, 5 (400-1, 3, 5)



図 7.3.1-1 採水地点位置図(日本原子力研究開発機構(2015)に加筆)



13MI37号孔専用 外径66mm間隙水圧モニタリング装置

- 図 7.3.1-2 13MI37 孔の区間編成
- 7.3.1.2 採水方法

表 7.3.1-1 に分析項目、必要水量を示す。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 6mm 内径 4mm のナイ ロンチューブの圧力を解放して採水した。

希ガス採水は以下の手順により行った。試料採取時の概念図と写真を図 7.3.1-3 に示す。

- ④ 銅管(外形 12mm、内径 10mm)の両側に自動閉鎖機構付きのワンタッチソケットカプラー(以後ソケットと称す)を接続する。
- ② 各採水区間へつながっているチューブに採水装置を接続する。採水装置は、①をソケットのついたチューブで連結する。採水装置の下流端に圧力計とバルブを備えたものである。
- ③ 区間のバルブを解放し、圧力レギュレーターを確認する。
- ④ 圧力レギュレーターを調整し、銅管内とチューブ内の気泡とを排出する。このとき、③で
 確認した圧力が大きく低下しないようにレギュレーターの下流のバルブを調節する。
- ⑤ 十分に地下水を通水後、レギュレーターのバルブを閉める。
- ⑥ 上流側から順次チューブと銅管とを外す。銅管にはソケットがついているため、地下水と
 地下水圧は保持される。
- ⑦ ソケットが付いた状態で銅管の両端をクランプで締める。クランプが十分にしまったこと を確認する。
- ⑧ 銅管からソケットを外し、採取深度、孔番、採取日、採取番号を記入する。





図 7.3.1-3 希ガス採取システムの概念図と銅管

- 上側)希ガス採取システムの概念図
- 中側)銅管の両側に接続した自動閉鎖機構付きのワンタッチソケットカプラー
- 下側)クランプにより密閉状になった銅管のサンプラー

その他の主要溶存イオン、微量元素、TOC、水素酸素同位体比、³H、¹⁴C、³⁶C1、CFCs、SF₆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、SO₄、C1、I、F、Si、B)の分析用サンプルは以下のように採取した。100mlのプラスチック製ボトルに容器の1/10程度地下水を入れ、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倍量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、A1、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 2ml の水を捨て、そののち、濃硝酸 1ml を添加する。

TOC (TC、DIC、TOC(NPOC))の分析用のサンプルは、50ml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 25ml 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。

³H 試料の採水には、1L 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。

¹⁴C とδ¹³C 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、1Lのフロロバリアボトルを2本使用する。

³⁶C1 試料には 1L のポリビンを使用する。作業者の皮膚に付着している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 (2015a)の推奨する方法に準じ、125ml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。チューブの外 側をよく地下水で洗浄し、、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。

SF₆の採取も USGS (2015b)の推奨する方法に準じ、500ml のデュラン瓶に、PTFE 製のフタを用いる。 採水方法は、CFCs と同様である。

なお、採取したサンプルは、トリチウム(³H)と³⁶C1、希ガスのサンプルを除き、環境温度4℃前後 に保持して実験室に送付した。

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	100mL×2本	
微量元素	微量に含まれる金属元素を定量	100mL×1 本	
水素・酸素同位体比	水素・酸素同位体比を評価	10mL×2本	
炭素同位体	地下水年代測定のために地下水	1000mL×1 本	
$({}^{14}C, \delta {}^{13}C)$	中の無機炭素の ¹⁴ C、 ¹³ C を評価		
炭素同位体	地下水年代評価や、塩化物イオン	1000mL×2 本	
(³⁶ C1、δ ³⁷ C1)	の起源情報となる、塩化物イオン		
	同位体(³⁶ C1、 ³⁷ C1)を評価		
TOC	地下水中溶存有機炭素量を評価	50mL×1本	
アルカリ度	アルカリ度を評価し、その結果か	50mL×1本	
	ら炭酸水素イオン濃度を評価		
希ガス濃度	地下水年代指標となる希ガス	銅管×3本	地表でクラ
	(He、Ne)濃度を評価		ンプ留め
CFCs	溶存クロロフルオロカーボン量	125mL×3 本	ホイルで被
	から、若い地下水の混入を評価		覆パッキン
SF ₆	六フッ化硫黄量から、若い地下水	500mL×2本	PTFE 製パッ
	の混入を評価		キン
トリチウム	トリチウム濃度から、若い地下水	1000mL×2 本	
	の混入を評価		

表 7.3.1-1 採水項目と採取目的および取得量

7.3.1.3 分析方法

地下水の溶存成分の内、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺、F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、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、³H、炭素同位体(¹⁴C、δ¹³C)、塩素 同位体(³⁶Cl、δ³⁷Cl)、希ガス、CFCs、SF₆、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, N0₃, S0₄)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 CO₂ 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、1994)。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(0.01mo1/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、社団法人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-Disparsive 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CO₂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。

- 7-8 -

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。

³H 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 10¹⁸ 個に対 して³H が 1 個存在する率である TU で示した。

¹⁴C 分析は、グラファイト・ターゲットー加速器質量分析法(AMS 法)で実施した(中村、2003)。試料水1リットルにつき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 CO₂ ガスを生 成させる。得られた CO₂ ガスを精製した後、コバルト触媒をもちいて 600℃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。分析は Beta Analytic Inc. で実施した。

³⁶C1 分析は、AgC1・ターゲットー加速器質量分析法(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。³⁶C1 の分析では、³⁶S 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 ³⁶S の ³⁶C1 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。

 δ^{37} C1 分析は、塩化銀-ヨウ化メチル(AgC1-CH₃C1)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)。試料水にから生成させた AgC1 沈殿に、ヨウ化メチル(CH₃I) を加え、塩化メチル(CH₃C1)に変換する。この CH₃C1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。

希ガスの定量は、希ガス質量分析装置 GV-5400(GV 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

- 7-9 -

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20K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。 SF₆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 SF₆の分析は地球科学研究所で実施した。

7.3.1.4 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 7.3.1-2 に示す。また、地下水の採取結果を表 7.3.1-3 に示す。一部の区間では湧水量が少なく、採取が困難な項目もあった。採取状況を図 7.3.1-4 と図 7.3.1-5 に示す。

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 量が大気平衡値であると仮定し、試料中の Ne 量が大気平衡値よりも大きけ れば、大気が混入したと仮定して、式(7.3.1-1)に示すように、過剰量に相当する He 量を差し引く。 また、Ne 量が大気平衡値よりも小さければ、式(7.3.1-2)に示すように、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。

$$He_{c} = He_{m} - (Ne_{m} - Ne_{0})\frac{He_{a}}{Ne_{a}}$$
(7.3.1-1)

$$He_{c} = He_{m} \frac{Ne_{0}}{Ne_{m}}$$
 (7.3.1-2)

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、Ne₀は大気との溶解平衡に達した Ne 濃度($2 \times 10^{-7} \text{ cc}_{\text{srp}}/\text{g}_{w}$)、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。

主要溶存イオン、同位体および希ガスの分析結果を表 7.3.1-4 と表 7.3.1-5 に示す。

項目	採水時間	区間圧力	ל (Mpa)	流量	pН	ORP	EC	DO	Т
区間		採水前	採水時	L/min		mV	mS/cm	mg/1	°C
13MI37-1	2014/8/18 12:00	1.8	1.3	0.5	8.33	-315	0.588	0.03	24.5
13MI37-2	2014/8/18 15:00	1.6	1.3	0.5	8.49	-320	0.716	0.00	24.5
13MI37-3	2014/8/18 12:00	1.6	1.5	0.5	8.41	-315	0.717	0.01	24.4
13MI37-4	2014/8/18 15:30	1.5	1.0	0.5	8.54	-298	0.733	0.01	24.3
200-1	2014/10/20 15:40	2.1	1.6	0.5	10.78	-320	0.774	0.02	22.1
200-3	2014/10/21 10:40	2.2	0.3	0.1	9.23	-334	0.680	0.20	22.4
200-5	2014/10/20 16:40	2.2	2.0	0.25	8.86	-359	0.573	0.03	22.5
300-1	2014/10/20 11:20	0.9	0.5	1	8.31	-325	0.363	0.10	22.1
300-3	2014/10/20 12:20	0.9	0.5	0.8	8.46	-303	0.574	0.13	22.2
300-5	2014/10/20 13:00	1.1	0.5	1	8.43	-321	0.611	0.06	22.0
400-1	2014/10/20 15:20	1.5	1.3	1.3	8.37	-293	0.395	0.00	23.8
400-3	2014/10/20 16:00	1.5	1.2	1.5	8.48	-288	0.428	0.04	23.8
400-5	2014/10/20 16:30	1.4	1.2	1.3	8.34	-270	0.831	0.01	23.5
10MI26-1	2014/10/20 11:10	2.6	2.0	1	8.53	-283	0.501	0.02	25.0
10MI26-2	2014/10/20 12:20	2.4	2.0	0.6	8.57	-300	0.471	0.01	24.8
10MI26-3	2014/10/20 11:40	2.4	2.0	1.3	8.68	-326	0.445	0.01	25.0

表 7.3.1-2 原位置計測結果



図 7.3.1-4 希ガス採取状況



(1) ボトルへの採水状況



(2) サンプルの採取状況図 7.3.1-5 ボトルへの採水状況

表 7.3.1-3 瑞浪超深地層研究所における地下水の分析結果

(1)主要溶存イオン

サンプルタ	Na	K	Mg	Ca	В	F	C1	NO3	S0₄	Si	ALK	TOC	TC	TIC	NPOC
リンフル名	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
13MI37-1	110	0.83	0.12	23	1.2	9.2	170	<0.01	4.9	6.7	0.62	0.85	7.2	6.4	0.21
13MI37-2	110	0.84	0.13	25	1.2	9.1	180	<0.01	6.0	6.7	0.57	1.1	7.0	6.0	0.14
13MI37-3	110	0.87	0.13	25	1.3	9.1	180	0.011	6.1	6.7	0.58	1.1	7.1	6.0	0.15
13MI37-4	120	0.92	0.29	29	1.3	9.1	200	0.008	5.5	6.8	0.54	0.84	6.5	5.6	0.13
200-1	69	0.36	0.072	15	1.1	9.5	49	<0.01	14	6.7	1.2	1.4	14	12	0.30
200-3	98	0.48	0.11	22	1.2	9.4	130	0.012	6.7	6.6	0.74	1.2	8.7	7.4	0.17
200-5	110	0.5	0.091	23	1.1	9.3	150	<0.01	5.3	6.6	0.65	1.1	7.4	6.3	0.15
300-1	75	0.4	0.14	16	1.3	9.5	63	<0.01	13	6.7	1.2	1.3	13	12	0.26
300-3	80	0.49	0.34	17	1.4	10	75	<0.01	10	6.4	1.1	1.4	13	11	0.24
300-5	110	0.76	0.82	25	1.3	8.9	150	0.009	7.0	6.3	0.85	1.2	10	8.9	0.20
400-1	94	0.64	0.47	18	1.5	8.8	96	0.56	12	6.4	1.3	1.7	15	13	0.36
400-3	86	0.56	0.3	18	1.3	8.8	89	0.009	11	6.4	1.1	1.2	12	11	0.25
400-5	98	0.7	0.57	19	1.2	8.7	100	<0.01	9.9	6.6	1.4	1.6	16	15	0.23
09MI21-1	120	0.93	<0.025	39	9.1	8.1	190	<0.01	0.62	7.2	1.0	0.75	1.8	1.1	0.20
09MI21-2	120	0.41	0.055	26	9.1	8.5	190	<0.01	0.34	5.7	0.48	1.2	5.3	4.1	0.17
09MI21-3	110	0.44	0.064	27	9.1	9.3	160	<0.01	0.69	6.1	0.56	0.98	6.1	5.1	0.15

(2)微量溶存イオン

サンプルタ	Br	Ι	Cs	Sr	Li	A1	Mn	Fe	Zn	Cu	As	Se	Rb	Ba
リンフル名	μ g/L													
13MI37-1	350	31	0.46	240	63	5.4	2.6	0.6	<0.5	0.24	0.49	<0.1	3.2	0.8
13MI37-2	370	37	0.43	270	66	5.8	3.4	2.6	<0.5	0.24	0.43	<0.1	3.2	0.93
13MI37-3	370	43	0.56	270	67	6.1	3.2	1.8	1.9	0.23	0.45	<0.1	3.5	0.94
13MI37-4	410	52	0.52	300	72	6.1	6.4	4.8	10	0.26	0.39	<0.1	3.6	1.3
200-1	120	24	0.29	79	78	7.6	1.6	1.7	1.5	0.55	0.33	<0.1	1.6	0.31
200-3	260	33	0.41	150	98	5.8	2.1	2.6	1.0	0.38	0.35	<0.1	2.3	0.6
200-5	290	40	0.41	170	100	7.5	2.1	2.3	0.4	0.21	0.34	<0.1	2.4	0.66
300-1	140	24	0.28	87	80	9.7	2.8	1.9	<0.1	0.46	0.42	<0.1	1.7	0.36
300-3	150	21	0.29	97	87	6.4	4.8	9.2	0.24	0.33	0.57	<0.1	1.7	0.53
300-5	290	67	0.41	200	120	3.7	12	13	<0.1	0.37	0.37	<0.1	2.6	1.4
400-1	190	45	0.38	150	110	7.6	7.6	6.6	<0.1	0.37	0.38	<0.1	2.2	1.1
400-3	180	44	0.31	130	98	8.0	5.6	16	1.2	0.4	0.35	<0.1	2.1	0.96
400-5	210	44	0.41	170	110	6.8	11	6.4	0.10	0.32	0.4	<0.1	2.4	1.3
09MI21-1	370	45	0.72	250	170	280	5.8	71	1.5	0.44	0.65	<0.1	3.6	11
09MI21-2	370	45	0.89	190	160	10	2.1	4.4	0.29	0.25	0.45	<0.1	2.3	0.47
09MI21-3	310	60	0.8	210	160	9.7	3.2	3.8	0.61	0.21	0.33	<0.1	2.5	0.51

(3)安定および放射性同位体

サンプルタ	³ Н	¹⁴ C	δ^{13} C	³⁶ C1/C1	δ ³⁷ C1	δD	δ 180	
リンノル泊	T.U.	pMc (%)	‰	$ imes 10^{-15}$	‰	‰	‰	
13MI37-1	ND	16.9 ± 0.1	-17.2	35.1 ± 2.5	-0.2 ± 0.1	-58.7 ± 0.2	-9.0 ± 0.07	
13MI37-2	ND	17.7 ± 0.1	-16.4	50.3 ± 2.8	-0.2 ± 0.1	-59.3 ± 0.3	-8.8 ± 0.05	
13MI37-3	0.5 ± 0.1	21.0 ± 0.1	-15.4	43.1 ± 2.6	-0.2 ± 0.1	-59.4 ± 0.2	-8.7 ± 0.05	
13MI37-4	ND	19.4 ± 0.1	-15.5	48.3 ± 2.7	-0.1 ± 0.1	-59.5 ± 0.3	-8.8 ±0.11	
200-1	0.9 ± 0.1	28.0 ± 0.1	-17.0	N. M	N.M \pm 0.1	-55.8 ± 0.2	-9.1 ± 0.09	
200-3	0.5 ± 0.1	22.6 ± 0.1	-17.9	N. M	N. M	-57.0 ± 0.2	-10.4 ± 0.02	
200-5	0.6 ± 0.1	22.5 ± 0.1	-19.3	N. M	N. M	-58.9 ± 0.2	-9.1 ± 0.07	
300-1	0.8 ± 0.1	23.4 ± 0.1	-15.1	N. M	N. M	-56.6 ± 0.3	-8.8 ± 0.03	
300-3	0.6 ± 0.1	16.1 ± 0.1	-13.8	N. M	N. M	-57.3 ± 0.1	-9.1 ± 0.03	
300-5	ND	17.3 ± 0.1	-14.6	N. M	N. M	-57.9 ± 0.2	-9.0 ± 0.09	
400-1	0.5 ± 0.1	13.3 ± 0.1	-13.6	N. M	N. M	-57.1 ± 0.2	-8.9 ± 0.02	
400-3	0.6 ± 0.1	23.3 ± 0.1	-15.1	N. M	N. M	-56.2 ± 0.3	-8.5 ± 0.42	
400-5	0.7 ± 0.1	14.7 ± 0.1	-12.0	N. M	N. M	-58.0 ± 0.0	-8.7 ± 0.07	
09MI21-1	0.4 ± 0.1	ND	ND	N. M	N. M	-60.1 ± 0.2	-9.1 ± 0.01	
09MI21-2	ND	20.6 ± 0.1	-13.7	N. M	N. M	-60.4 ± 0.1	-8.8 ± 0.02	
09MI21-3	ND	15.6 ± 0.1	-15.3	N. M	N. M	-60.4 ± 0.1	-9.0 ± 0.20	

(4)溶存ガス

	(CFCs 濃度		SF ₆ 濃度		計測値		補正値 (Ne補正)		
サンプル名	CFC-12	CFC-11	CFC-113		⁴ He	³ He/ ⁴ He	Ne	⁴ He	³ He/ ⁴ He	
		pg/kg		fmol/kg	cc _{stp} /g _w	-	cc _{stp} /g _w	cc _{stp} /g _w	-	
13MI37-1	0.59	0.93	0	0.51	5.3E-05	4.7E-07	1.6E-07	6.6E-05	4.7E-07	
13MI37-2	0.69	0.59	0	0.67	5.2E-05	4.8E-07	1.5E-07	7.0E-05	4.8E-07	
13MI37-3	1.40	1.42	0	0.38	3.1E-05	4.7E-07	1.2E-07	2.9E-05	4.8E-07	
13MI37-4	1.01	2.08	0	0.98	5.4E-05	4.5E-07	1.7E-07	6.5E-05	4.5E-07	
200-1	1.53	1.54	0	0.64	5.5E-06	4.3E-07	1.9E-07	5.9E-06	4.3E-07	
200-3	1.56	2.18	0	0.54	3.1E-05	4.6E-07	1.2E-07	5.5E-05	4.6E-07	
200-5	0.69	1.22	0	0.47	3.8E-05	4.8E-07	1.2E-07	6.5E-05	4.8E-07	
300-1	1.55	2.43	0	0.78	2.9E-05	4.7E-07	1.8E-07	3.3E-05	4.7E-07	
300-3	2.12	3.71	0	0.58	3.9E-05	4.4E-07	1.2E-07	6.2E-05	4.4E-07	
300-5	0.61	1.49	0	0.43	4.8E-05	5.0E-07	1.1E-07	9.1E-05	5.0E-07	
400-1	1.81	3.35	0	0.74	4.7E-05	4.7E-07	1.5E-07	6.1E-05	4.7E-07	
400-3	0.92	1.60	0	0.67	4.7E-05	4.3E-07	2.2E-07	4.7E-05	4.3E-07	
400-5	1.29	2.29	0	0.67	3.7E-05	4.3E-07	1.5E-07	4.9E-05	4.3E-07	
09MI21-1	0.83	1.18	0	0.69	5.2E-05	4.7E-07	1.4E-07	7.3E-05	4.7E-07	
09MI21-2	2.56	4.29	0	0.43	4.8E-05	5.3E-07	1.3E-07	7.7E-05	5.3E-07	
09MI21-3	2.55	3.86	0	0.30	4.0E-05	4.4E-07	2.6E-07	4.0E-05	4.4E-07	

7.3.1.5 考察

(1) 主要溶存イオンの経時変化

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 7.3.1-6 に示す。

200m ステージ、300m ステージ、400m ステージでの主要溶存イオンの分析結果は、それほど大きく変化していない。200-1 では、Na-C1 型から Na-HCO₃-C1 型へと変化してきており、浅部の地下水の流入が顕著になっていることを示していると考えられる。300m ステージでは 2009 年の調査では C1 濃度が高かったが、徐々に低下しており、浅層水の流入による混合が進んでいると考

えられる。400m ステージでも 300m ステージと同様に、浅層水の流入による混合が徐々に進んで いると考えられる。一方で 300m 坑道の両端部に位置する 09MI21 孔、13MI37 孔では、経時変化の データは少ないが、200~400m ステージでのボーリング孔に比べてへキサダイアグラムが大きく、 浅層水の混合がまだ進んでいないものと考えられる。



図 7.3.1-6 ヘキサダイアグラムの時間変化

(2) 主な成分の時間変化

浅層水の指標として代表的な³HとδDについて、時間変化を図 7.3.1-7に示す。

³Hは、瑞浪付近の河川水の調査結果などから浅層水では 3.7TU となることが知られている(JNC, 2003)。³Hは、半減期が 12.3 年のため、深層水には含まれないと考えられる。³H 濃度の変化は有意には見られない。200m ステージから 300m ステージでは約 1 TU 程度で、浅層水の混入率は 30%程度と推定される。今年度の調査結果では全体的に混入率が低下している。400m ステージでは0.6TU 程度で混入率は 20%程度と推定される。一方で、ここでは示していないが、09MI21 孔と13MI37 孔では、一部の区間を除いて³H が検出されないため、浅層水の混合率は 10%以下と考えられる。

δDは涵養域と流出域のこれまでの調査結果から、涵養域では-50‰程度、流出域では-61%程度

である。流出域で水素同位体比が低いのは、Iwatsuki et al. (2005)にも示されているように、 これらが氷期に涵養した地下水と考えられるためである。長谷川ほか(2010)においても、流出域 では地下水年代が2万年を超えることから氷期の地下水である可能性が指摘されている。

δDについては、浅層水の混合率が徐々に低下していたが、昨年度から増加傾向を示している。 δDの結果でも浅層水の混合率は20~30%程度と推定される。³HとδDの相関については後述する。



図 7.3.1-7 浅層水の指標の時間変化

(3) 深層水指標の経時変化

深層水の指標として代表的な Cl, ⁴He について、時間変化を図 7.3.1-8 に示す。

C1 濃度は、涵養域では 0~1mg/1 であることが涵養域のボーリング孔、河川水の調査結果など から知られている(JNC, 2003)。深層水では、100~1000mg/1 であることが、流出域でのボーリン グ孔での調査結果から知られている。この C1 は、瑞浪層群が堆積時に取り込まれた海水が残留 したもので、化石海水であると推定される。

C1 濃度は、400-1,3,5 では減少しているが、200-3、200-5、300-5 など上昇している地点もある。基本的に、化石海水は有限で、浅層水との混合が時間とともに進むため、濃度は低下すると考えられる。

⁴He も涵養域から中間域では大気平衡値 (4.8×10⁻⁸ cc_{STP}/g_w)~10⁻⁶ cc_{STP}/g_w オーダーと濃度が低 く、³He/⁴He も 10⁻⁸オーダーと低いが、流出域では 10⁻⁶ cc_{STP}/g_w オーダーと濃度が高く、³He/⁴He も 10⁻⁷オーダーと高い。これは涵養域から中間域は、原位置平衡で蓄積しており、流出域は外部 フラックスが流入しているためと考えられる。

He 濃度も全体的には増加傾向にある。ただし、C1 濃度と同様に 400-1, 3, 5 などでは減少傾向にある。200m-1 では減少傾向が顕著であり、若い地下水が流入してきているものと考えられる。

- 7-17 -



図 7.3.1-8 深層水の指標の時間変化

(4) 浅層水指標の比較

浅層水の指標として有用と考えられる、³H、δD、CFC-12、SF₆について、浅層水混合率の比較 を行った。この結果を図 7.3.1-9 に示す。

³H と δ D は、前述のように、³H は浅層水で 3.7TU、深層水で OTU、 δ D は浅層水で-50‰、深層 水で-61‰とした。CFC-12 は大気換算濃度で、浅層水を 523.4pptv、深層水を 0pptv、SF₆は浅層 水では 2.7pptv、深層水では 0pptv とした。これは、浅層水は現在の大気と溶解平衡にあると考 え、NOAA 公表の北半球平均値、深層水では生産開始が 1950 年以降の CFC や SF₆は溶解していない とした。

³Hから計算した浅層水の混合率とその他の指標から計算した浅層水の混合率を示す。

³H と δ D には、概ね相関がある。³H については、浅層水から深層水で 0~3.7TU 変化し、測定精 度が 0.1TU、測定下限値が 0.3TU のため、解像度 3%で 10%以下の混合率は不明確である。 δ D に ついては、浅層水から深層水で-50~-61‰、測定精度が 1‰程度なので、解像度は 10%程度であ る。今年度の計測結果では、測定回数を増やしているため、精度は 0.2‰程度となっており、解 像度は 2%である。このため、³H と δ D は浅層水の指標として有効ではないかと考えられる。³H は 12.3 年の半減期を持ち、数十年の滞留時間で有意に減少するため、放射壊変の影響を考慮すると 混合率がやや小さく出る可能性がある。ここでも、³H は δ D に比べて混合率が小さく出ており、 放射壊変の影響を受けているのではないかと考えられる。

CFC-12は、フロンガスで有り生産開始の1950年代から、大気中の濃度が単調に増加している。 ただし、1990年以降は排出規制の対象となったため、大気中での濃度は1990年以降一定ほぼ濃 度となっている。このため、地下水中の濃度から大気中の濃度を算出し、それに対応する大気濃

- 7-18 -

度を求めることで、滞留時間が評価できる。近年、若い地下水の年代測定に良く用いられている。 ³H と CFC-12 では、CFC-12 がほとんど検出されおらず、CFC-12 から求めた混合率はほぼ 0%となっ ている。これは、CFC-12 が還元環境では、微生物の分解などの影響で減衰するためと考えられる。 微生物による分解は、いろいろな文献で指摘されている(例えば、Kashiwaya et al., 2015)。こ のため、CFC-12 は浅層水の混合指標としては、本地点では浅層水の指標としては利用が難しい。

SF₆は、地球温暖化ガスの一種で、CFC と同様の原理で滞留時間の評価に利用できる。³H と SF₆ は概ね相関がある。このため、SF₆も浅層水の指標になり得ると考えられる。CFC と SF₆はともに 地球温暖化ガスであるが、SF₆の方がやや安定性が高いと考えられる。SF₆も³H と同様に大気中の 濃度が変化しているため、その影響を受ける可能性があるが、SF₆は排出規制対象となった 1990 年以降ほぼ一定濃度であるため、微生物分解の影響を受けていなければ³H に比べて有効であると 考えられる。



図 7.3.1-9 浅層水の指標の相互比較

(5) ボーリング孔調査結果の研究坑道での確認

研究坑道で地下水年代指標の調査結果、例えば、⁴He、³⁶C1、δD、¹⁴C と広域的な調査結果との 比較を行った。

⁴He と ³He/⁴He の関係を図 7.3.1-10 に示す。ヘリウムは涵養域から中間域までは、原位置生成 で蓄積し、原位置生成の ³He/⁴He は 2×10^{-8} 程度である。 流出域では、原位置生成したものに外 部からのフラックスが混入し、⁴He と ³He/⁴He が大きくなる。フラックスの ³He/⁴He は、 5×10^{-7} 程度である。

研究坑道での⁴He 濃度と³He/⁴He は、やや高い⁴He 濃度、流出域とほぼ同じ³He/⁴H であり、流出 域のより深部から供給されていると考えられる。この結果から、研究坑道のヘリウムは、流出域 の地下水を主体としていると考えられる。



図 7.3.1-10 ⁴He と ³He/⁴He の関係

C1 と³⁶C1/C1 の関係を図 7.3.1-11 に示す。降水の C1 濃度は 0~1mg/1 と低く、³⁶C1/C1 は 300~400×10⁻¹⁵ と高い。このため、涵養域でも C1 濃度が高く、³⁶C1/C1 が 200×10⁻¹⁵ と高い。ただし、³⁶C1/C1 は涵養域から中間域にかけて変動が顕著である。原因は明確ではないが、C1 濃度が低いため、岩石 起源の C1 が混合して、³⁶C1/C1 が低下していると考えられる。流出域では C1 濃度は 50~300mg/1 と 高く、³⁶C1/C1 は原位置平衡程度(50×10⁻¹⁵) と高い。 これは、瑞浪層群堆積時に流入した化石海水 が残留しているためと考えられる。

研究坑道では、流出域と同様に C1 濃度が高く、36C1/C1 が 50×10-15 と高い。C1 濃度に変動が大き

- 7-20 -

いのは、浅層水の混合による希釈と化石海水の流入による濃度変化と考えられる。C1の残留は、前述のように瑞浪層群堆積時に流入した化石海水と考えられ、その残留率は深度によって大きく異なると考えられる。これは、浅層水による希釈が場所によって異なるためである。



図 7.3.1-11 C1 と ³⁶C1/C1 の関係

¹⁴C は涵養域から中間域にかけて減少傾向が見られ、涵養域では数千年、中間域では 1~2 万年程 度の年代が得られていた。HCO₃ 濃度は涵養域で高く、流出域では低い傾向があった。また、流出域 では、HCO₃ 濃度が低いため、前処理による C の捕集が困難で、¹⁴C 分析値にバラツキが大きかった。

研究坑道での¹⁴C 濃度は、混合が進んでいる 200~400m では HCO₃ 濃度と¹⁴C 濃度に増加傾向がある。 09MI21 や物質移行地点(12MI30, 12MI31, 13MI37)では、HCO₃ 濃度が低く、¹⁴C 濃度が増加している。 これは、これまでにも流出域の調査で見られた、C の捕集が困難なために、¹⁴C の分析値にバラツキ が出ているものと考えられる。



図 7.3.1-12 HCO3濃度と¹⁴C濃度の関係

水素・酸素同位体比の関係を図 7.3.1-13 に示す。浅層水での $\delta D \geq \delta^{180}$ は大きいが、流出域で の $\delta D \geq \delta^{180}$ は小さい。 $\delta D \geq \delta^{180}$ は涵養域~中間域~流出域へと順次低下している。研究坑道 の地下水は、この流出域から中間域に位置する。これは、元々は流出域付近に位置していたが、浅 層水の混合によって $\delta D \geq \delta^{180}$ が変化したためと考えられる。流出域と浅層水の地下水の関係から、 最大で 50%程度の混合が発生していると考えられる。



図 7.3.1-13 水素同位体比と酸素同位体比の関係

(6) 浅層水混合の概念モデル

立坑周辺の地下水は、流出域の特徴を有するため、流出域の地下水の率が現状では高いと考え られる。ただし、これまでの³H、δD、SF₆などの結果から、浅層水も有意に混合していると考え られる。³Hの調査結果に基づいて、浅層水の混合率を図 7.3.1-14 に示す。浅層水の混合は、主 立坑と換気立坑周辺で主に進み、浅層水の混合率は、200~300m ステージでは 30%程度、400m で は 20%程度、物質移行調査地点では 10%程度、09MI21 孔では、10%以下となっている。

総湧水量は、概ね 500~800 m³/日で変動しており、平均を 600 m³/日として 9 年間程度湧出し ていると考えると、これまでに約 200 万 m³の湧水があったことになる。花崗岩の間隙率を 2%とす ると、一辺 500m の立方体分と等価な領域の地下水が湧出したことになり、これは、流出域の地 下水が浅層水に入れ替わるには十分な湧水量と考えられる。ただし、各成分の濃度が近年それほ ど大きく変化していないことから、定常的な状態に入っている可能性もある。



図 7.3.1-14 浅層地下水流入の概念図

7.3.2 瑞浪における地下水流動・物質移行解析

7.3.2.1 掘削に伴う地下水流動・水質変化の概要

主立坑や換気立坑、調査坑道の掘削に伴い比較的大きい範囲で地下水圧の低下、水質の変化が発生 している。まず、主立坑および換気立坑への湧水量の経時変化を図7.3.2-1に示す(尾上ほか、2014)。 総湧水量は、概ね500~800 m³/日で変動しており、平均を600 m³/日として9年間程度湧出している と考えると、これまでに約200万m³の湧水があったことになる。花崗岩の間隙率を2%とすると、500m 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)でも観測 されている。この結果を図 7.3.2-2 に示す(尾上ほか、2014)。WR によって湧水量が大きく異なること がわかる。また、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。

地下水が湧出する影響で、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。ボーリング孔 の位置図と水圧低下を図 7.3.2-3 に示す(尾上ほか、2014)。

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 7.3.2-4 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ている。特徴的なのは、 湧水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。また、換気立坑の深度 300m と深度 400m 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。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。特にかなり離れた 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、研究所建設に伴いかなり広い範囲で水圧低下が発生していると推定される。

立坑の建設に伴い、周辺の水質も変化している。立坑への湧水の C1 濃度の変化を図 7.3.2-5 に示 す(尾上ほか、2014)。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た後、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ボーリングでの C1 濃度の変化を示している。これらの結果から、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)。



図 7.3.2-1 立坑への湧水量の経時変化





(1) 主立坑 WR 湧水量

(2) 換気立坑 WR 湧水量





図 7.3.2-3 研究所周辺での水圧低下の経時変化



図 7.3.2-4 立坑周辺での地下水湧出と水圧低下の概念図


図 7.3.2-5 立坑湧水の C1 濃度の経時変化

7.3.2.2 解析モデル

前述のように瑞浪超深地層研究所建設により、地下水流動の変化が発生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、JAEA が作成した地形・地質などを考慮したモデルに基づいて作成した(小坂ほか、2010)。解析モデル図を図 7.3.2-6 に示す。解析モデルは主要な地層と主立坑断層をモデル化した。その他の断層については、スメアード法(長谷川ほか、2004)で間接的に表現することとした。モデル化した断層を図 7.3.2-7 に示す。



(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 7.3.2-6 解析に用いた FEM 解析メッシュ



図 7.3.2-7 解析モデルで考慮した断層

7.3.2.2 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7.3.2-8のように設定した。

地下水流動解析の境界条件は、小坂ほか(2010)を参考に、涵養量を10 mm/y と設定し、その他 の境界条件を不透水境界条件として広域の地下水流動を実施した。その解析結果をモデル地表 面・側面・底面に圧力固定条件として設定した。掘削後の状態を再現するため、掘削終了してい る立坑位置の節点について、大気開放条件として圧力水頭0mを設定したケースと、WR、200m予 備ステージ、300m研究アクセス坑道で観測されている湧水量と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、浅層水の流入割合を知るためモデル地表面をトレーサー濃度1で 固定し、その他を0で固定したケースと、立坑への深部水流入の状況とC1濃度を計算するため、 モデルの境界でトレーサー濃度の固定値に深度依存性で与えたケース(菱谷ほか,2013)で解析を 実施した。深度依存性の濃度境界の固定値は0から1に正規化した。C1濃度は、トレーサー濃度 を正規化前の値に変換し直して、それを計算結果とした。どちらのケースも、立坑では濃度勾配 0の境界を設定した。このため、立坑から流出する地下水の濃度は、解析モデル内の濃度に依存 することになる。



図 7.3.2-8 解析の境界条件図

(2) 物性値の設定

解析に用いた物性値には、既存の報告(小坂ほか,2010、尾上ほか,2014)を参考に、表 7.3.2-1 のように設定した。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 100m,横分散 10m、分子拡散係数は影響が小さいとして無視した。

7.3.2.3 解析結果

(1) 定常解析結果

立坑の境界条件を大気開放としたケースと、湧水流量既知としたケースについての定常の地下水 流動解析を実施した。主立坑と換気立坑を通過する鉛直断面図での水圧低下を図 7.3.2-9 に示す。 水位が大きく低下する領域は、低透水断層 s200_13 と s200_15 で囲まれた部分になっており、また、 主立坑断層の北東側に比べ南西側、つまり換気立坑側では、水圧低下が大きくなる傾向がある。こ

- 7-31 -

の傾向は、大気開放・湧水流量既知の両ケースで共通の傾向であり、大気開放のケースではその傾向が顕著である。これは、透水性の低い主立坑断層の影響で、水圧低下が主立坑側に伝播しないためと考えられる。また、両ケースとも、主立坑断層の北東側では高透水のs200_15_2 断層の影響で、水圧低下が小さくなる傾向にある。これは、s200_15_2 断層が水みちとなり地下水を供給しているためと考えられる。水圧が低下した領域が断層によって区切られており、これらの透水係数によって、水圧低下の形態が大きく変化することが予想される。

ボーリング孔での全水頭の鉛直分布を図 7.3.2-10 に示す。主立坑断層の北東側に位置する MSB-4, DH-15, MIZ-1 のほうが、換気立坑側に位置する DH-2, MSB-1~MSB-3 よりも、水圧低下が小さい。 なお、MSB-3 については、孔口は主立坑断層の北東側にあるが、斜め孔であり、深度 50m ほどで主 立坑断層と交差しており、それより深い部分は換気立坑側に位置している。このため、大部分は換 気立坑側の圧力低下の挙動に近い。主立坑断層の北東側に着目すると、MSB-4, MIZ-1 と比較して、 DH-15 の水圧低下は非常に小さい。これは、DH-15 が低透水断層 s200_13 と s200_15 で挟まれた領 域の外側に位置しているためと考えられる。

地層名	$K_{H}[m/s]$	K _V [m/s]	幅[m]	間隙率[-]	比貯留係 数[1/m]
瀬戸層群	1.00E-05	1.00E-05	-	0.20	1.0E-06
瑞浪層群	1.00E-08	1.00E-10	_	0.20	1.0E-06
上部割れ目帯	2.00E-08	2.00E-08	-	0.01	1.0E-06
下部割れ目 低密度帯	2.00E-08	2.00E-08	-	0.01	1.0E-06
日吉断層	1.00E-11	1.00E-11	10	0.01	1.0E-06
月吉断層	1.00E-11	1.00E-11	8	0.01	1.0E-06
主 立 坑 断 層 (堆積岩部)	5.01E-08	5.01E-08	1	0.01	1.0E-06
主 立 坑 断 層 (花崗岩部)	3.16E-11	3.16E-11	-	0.01	1.0E-06
s200_13	3.16E-10	3.16E-10	32	0.01	1.0E-06
s200_13_2	1.26E-06	1.26E-06	9	0.01	1.0E-06
s200_15	1.00E-11	1.00E-11	10	0.01	1.0E-06
s200_15_2	6.31E-06	6.31E-06	17	0.01	1.0E-06
sh180_07	7.94E-06	7.94E-06	5	0.01	1.0E-06
sh180_08	5.01E-07	5.01E-07	12	0.01	1.0E-06
sh180_09	1.00E-06	1.00E-06	12	0.01	1.0E-06
sb3_11	1.00E-11	1.00E-11	12	0.01	1.0E-06
sb3_17	1.59E-06	1.59E-06	10	0.01	1.0E-06
sb3_19	1.00E-11	1.00E-11	10	0.01	1.0E-06

表 7.3.2-1 瑞浪地域サイトスケールの物性と断層幅



図 7.3.2-10 全水頭のボーリング孔鉛直分布図(立坑境界条件感度解析)

それぞれの地層・断層の影響を見るため、瑞浪層群、上部割れ目帯、下部割れ目低密度帯、断層 のそれぞれの透水係数について、1/10,1倍,10倍とした感度解析を実施した結果を図7.3.2-11~ 12に示す。ここで立坑の境界条件は、湧水流量既知の境界とした。

各地層・断層とも、透水係数を上げると水圧低下量が小さくなる。特に、断層と上部割れ目帯の 透水係数変化の影響が顕著である。断層以外の地層については、透水係数を下げると水圧低下の影 響範囲が僅かながら広がっている。これは、感度解析対象の地層と低透水性断層の透水係数の差が なくなって、相対的に低透水性断層が遮水壁として作用しなくなるためと考えられる。断層の透水 係数が大きい場合でも同様である。



図 7.3.2-11 水圧低下量(定常,各地層の透水係数感度解析)



図 7.3.2-12 ボーリング孔位置での全水頭(定常,各地層・断層の透水係数感度解析)

定常の物質移行解析での浅層水の混合率を主立坑と換気立坑を通る断面で図化したものを図 7.3.2-13 に示す。立坑浅層水の流入については、瑞浪層群の感度が大きい。瑞浪層群は花崗岩に比 べて透水係数が低く、鉛直方向に2オーダーの透水異方性を設定しており、キャップロックとなっ ている。透水係数が上がると、キャップロックとしての機能が低下し、浅層水の流入が多くなる。 また、下部割れ目低密度帯と断層の透水係数を下げた場合に、浅層水の流入が顕著になっている。 これは、これらの地層による深層水の供給が低下するため、浅層水の流入が優勢になったものと考 えられる。図 7.3.2-14 に示すように、主立坑と換気立坑位置で浅層水の流入率を比較すると、断 層の影響が最も大きくなっている。これは、前述のように断層によって周辺からの流入が制限され ているためと考えられる。



図 7.3.2-13 立坑周辺での浅層水の流入(定常,各地層の透水係数感度解析)



図 7.3.2-14 立坑での浅層水進入率(定常,各地層・断層の透水係数感度解析)

定常の物質移行解析での深層水の流入状況を主立坑と換気立坑を通る断面で図化したものを図 7.3.2-15 に示す。深層水の流入は、浅層水流入の逆になる。

深層水の流入を Cl 濃度に換算して示したものを図 7.3.2-16 に示す。Cl 濃度の実測値と解析値と は概ね一致している。ただし、主立坑での Cl 濃度の深度方向への増加が、解析値と実測値とでは 整合していない。



図 7.3.2-15 深層水の流入(定常,各地層の透水係数感度解析)



図 7.3.2-16 立坑位置での Cl⁻濃度(定常,各地層・断層の透水係数感度解析) (実測値は黒線で示す。立坑掘削により時間的に変動するため、範囲で示した。) ここまでで、断層と母岩の透水係数のバランスや断層の透水係数の設定で、水圧低下や表層水の 混合率が大きく変化することがわかった。そこで、断層の有無の流動場への影響を調べるため、す べての断層を無くしたケース、主立坑断層以外を無くしたケース、主立坑断層以外の低透水断層の みを無くしたケースを実施した。立坑の境界条件は、湧水流量既知境界とした。

図 7.3.2-17 に断層の扱いによる水圧低下、浅層水、深層水流入の変化を示す。図 7.3.2-18 と 19 には、ボーリング孔位置での水圧低下と、立坑での表層水の混合率と C1 濃度を示す。断層立坑を 通過する鉛直断面図を見ると、断層無しのケースにより、水圧低下の範囲が断層の有無と透水係数 の評価により大きく変化することが確認できる。また、断層を主立坑断層のみとしたケースを見る と、主立坑断層の存在は水圧低下の範囲に大きく影響せず、並走する断層の有無が大きく影響する ことが確認できる。低透水断層のみ無しのケースを見ると、高透水断層の影響も大きいことが確認 できる。



図 7.3.2-17 断層の扱いによる水圧低下、浅層水、深層水流入の変化



図 7.3.2-18 ボーリング孔位置の全水頭(定常,断層の有無についての感度解析)



図 7.3.2-19 立坑位置のトレーサー濃度(定常,断層の有無についての感度解析)

瑞浪層群は透水係数が低いだけでなく、2 オーダー鉛直方向に透水係数を小さくする異方性が設 定されている。異方性により、水圧低下や地表水の流入がどの程度影響を受けているかについて感 度解析を実施した。この結果を図 7.3.2-20~22 に示す。瑞浪層の異方性の感度解析では、透水係 数が大きいほど水圧低下が小さくなり、浅層水の流入が多くなった。基本ケースでは2 オーダーの 透水異方性でキャップロックとして作用していたものが、透水係数を大きくしたことにより作用が 小さくなる。

図 7.3.2-21 に示すように、透水異方性を緩和すると、浅層水の流入が多くなるが、立坑周辺の 水圧分布は大きく変化しない。これは、瑞浪層群よりも断層が水圧分布について影響が大きいため と考えられる。また、図 7.3.2-22 に示すように、深層水の流入については浅層水の流入の増加に 伴い低下する。ただし、浅層水と深層水の流入については、全体の様相は変わっているものの、立 坑ではそれほど大きな変化とはなっていない。



図 7.3.2-20 瑞浪層群の異方性の変化による水圧低下、浅層水、深層水流入の変化



図 7.3.2-21 瑞浪層群の異方性の変化によるボーリング孔位置の全水頭の変化



図 7.3.2-22 瑞浪層群の異方性の変化による立坑位置のトレーサー濃度の変化

(2) 非定常解析

前述のように、定常解析を実施してきた。この結果、立坑や研究坑道に実測値に基づいて流量境 界条件を与えることで、概ね整合的な水圧低下や浅層水の流入、C1 濃度の分布が再現できる見通し を得られた。このため、流量境界条件で非定常解析を実施した。

非定常解析は、2005年1月1日をスタートとし、立坑掘削の進捗を考慮して実施した。立坑周辺 での水圧低下、浅層水の流入、深層水の流入を図7.3.2-23~25に示す。なお、時間刻みは7日間 とした。水圧低下については、全体に過大になっている。これは定常解析とは異なり、流量が時間 的に変動するためと考えられる。また C1 濃度についても、主立坑では C1 濃度の上昇が、換気立坑 では C1 濃度の上昇後の低下経過傾向が再現できていない。



図 7.3.2-23 鉛直断面図 立坑付近拡大(非定常計算)



図 7.3.2-24 ボーリング孔ごとの全水頭履歴(非定常計算)



図 7.3.2-25 WR での Cl⁻濃度計算結果・観測値・湧水量観測値

7.3.2.4 考察

立坑などの掘削に伴う地下水流動・物質移行現象を評価するために、地下水流動解析を実施した。 地下水流動の定常解析では、立坑での境界条件について、大気圧解放による圧力既知境界条件を実測 値に基づく流量既知境界条件とを比較し、水圧低下が過大ならない、流量既知境界条件を用いること とした。断層と地層の感度解析を実施した結果、水圧の変化には上部割れ目帯と断層、浅層水や深層 水の流入については断層の感度が高かった。断層について感度が高いため、断層の有無について感度 解析を行った。この結果、断層によって水圧低下とその領域が大きく変わるだけでなく、浅層水の深 部への流入にも断層が重要な役割を持っていると考えられた。瑞浪層群の異方性については、浅層水 の供給に重要であると考えられたため感度解析を実施した。この結果、瑞浪層群の異方性は、水圧低 下にはそれほど影響しないものの、浅層水や深層水の流入には影響が顕著であった。非定常解析も実 施したが、水圧低下が過大になる。また、換気立坑でのC1 濃度の増加は再現できるものの、その後の C1 濃度の低下と主立坑でのC1 濃度の増加が十分再現できていない。このため、透水係数の見直しや、 浅層水の流入を再現できるような設定について検討する必要がある。 7.3.3 幌延における地下水調査

7.3.3.1 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 7.3.3-1 に示す通りである。採水区間は主に循環機能付きの地点とした。



図 7.3.3-1 幌延深地層研究センターにおける採水地点

⁽日本原子力研究開発機構、2014)

7.3.3.2 採水方法

採水は、主要溶存イオン、水素酸素同位体比、塩素同位体比分析用と希ガス分析用途を分けて実施 した。希ガス分析は、圧力制御式と循環式とで試料を採取した。この採水の概念図を図7.3.3-2に示 す。圧力制御式は、前節で説明したとおりであるが、採水地点は湧水量が少なく、溶存ガス量が多い。 これまでに数十分~数時間程度の地下水を流して採取したが、圧力低下によって脱ガスが顕著であっ た。このため、流水量を可能な限り絞り、数週間程度原位置にサンプラーを静置して採取した。流水 量は、水滴がぽたぽたと流れる程度の量(数 cc/min 程度)とした。循環式では、パッカーなどで区切 られた区間から鋼管を通水し、再度パッカー区間に戻す形態を数週間程度実施して採水した。これは、 圧力が低下してガスが分離し、ガスが地下水に溶存した状態で採取することが困難なためである。循 環しているため圧力の低下を抑え、元の圧力で採取することが可能であると考えられる。装置は JAEA が設置したものを利用した。その他の分析用は、圧力を解放した状態で採取した。採水地点周辺は透 水係数が低く、揚水可能量も少ないため、大量の試料を必要とする³H,¹⁴C、CFCs, SF₆などは実施して いない。原位置での pH, ORP, DO, EC,温度などの計測には、数+ m1/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 7.3.3-2 原位置での希ガス採水方法の概念図

7.3.3.3 分析方法

地下水の分析は 7.3.1.3 と同様に実施した。

7.3.3.4 分析結果

地下水の分析結果を表7.3.3-1に示す。なお、Heの脱ガスおよび空気混入の補正方法は、式(7.3.1-1) と式(7.3.1-2)に示すとおりである。希ガスの分析結果の内、V250-M02#③~⑧は6本の銅管を接続し て、約2週間毎に2本ずつを採取していったものであり、循環過程での濃度の変化を調査したもので ある。

表 7.3.3-1 地下水の分析結果

(1)主要溶存イオン

++、プルタ	Na	К	Mg	Ca	В	F	CI	NO3	SO4	Si	ALK	тос	TC	TIC	NPOC
リノノル石	mg/L	meq/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L									
07-V140-M01①	3400	120	70	110	110	<10	4200	<5	<50	34	52	45	670	620	29
07-V140-M012	3500	120	66	110	110	<10	4200	24	<50	33	52	58	670	620	28
07-V140-M01③	3300	110	65	100	100	<10	4100	<5	<50	30	52	8.8	630	620	23
08-E140-C01#1	1600	58	23	40	53	<5	1400	1.7	<25	32	39	44	520	480	32
08-E140-C01#3	2100	68	31	50	74	<10	1900	10	<50	36	50	49	640	590	21
08-E140-C01#5	2800	91	46	78	110	<10	2900	8.4	<50	33	54	52	710	650	32
09-V250-M02#1①	2000	55	31	57	51	<5	2100	1.7	<25	30	38	38	510	480	18
09-V250-M02#12	2000	51	31	53	50	<10	2100	14	<50	30	38	42	490	450	13
10-E250-M01①	1800	56	28	45	62	<10	1700	<5	<50	39	41	36	540	510	21
10-E250-M012	1900	53	25	42	61	<10	1700	31	<50	35	41	42	540	490	17
10-E250-M013	1800	53	25	37	59	<10	1600	<5	<50	32	41	2.3	500	500	14
11-V250-TR02	3000	77	62	100	71	<10	3600	24	<50	32	43	44	560	520	16
11-W250-TR03①	4100	110	89	83	110	<10	5400	<5	<50	27	45	34	580	550	23
11-W250-TR03②	4200	110	92	100	100	<10	5600	12	<50	32	46	47	600	560	20
13-350-C01	4500	89	96	130	100	<10	5800	21	<50	27	45	50	570	520	21
13-350-C05#1	3600	77	67	97	100	<10	4400	20	<50	30	49	62	640	580	33
13-350TG5-M02-2	3200	96	60	91	86	<10	4000	23	<50	33	46	48	610	560	18
12-P350-M02①	3700	80	71	110	100	<10	4500	17	<50	29	49	58	670	610	25
12-P350-M022	3500	77	67	110	100	<10	4400	17	<50	24	49	7	590	590	20

(2) 微量元素

++、プリタ	Br	Ι	Cs	Sr	Li	AI	Mn	Fe	Zn	Cu	As	Se	Rb	Ba
リンフル石	µg∕L	µg∕L	µg∕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-M01①	25	17	<2	1600	12000	38	30	360	<2	<10	<2	<2	35	1300
07-V140-M012	30	15	<2	1600	9600	12	28	72	<10	4.364	<2	<2	34	1200
07-V140-M013	30	11	<2	1600	11000	<2	27	67	<10	35.3	<2	<2	37	1200
08-E140-C01#1	9.7	3.9	<2	410	4600	23	32	290	24.56	82.46	<2	<2	21	390
08-E140-C01#3	12	6.6	<2	590	4900	11	20	86	<10	<2	<2	<2	22	410
08-E140-C01#5	16	9.7	<2	1000	9800	9.5	19	120	6.91	10.124	<2	<2	29	730
09-V250-M02#1①	14	5.3	<2	580	5600	24	24	54	22.06	<10	<2	<2	25	410
09-V250-M02#1②	13	6.8	<2	590	4400	7.5	21	34	<10	<2	<2	<2	24	400
10-E250-M01①	8.1	5.6	<2	450	5300	13	26	220	<2	<10	<2	<2	24	330
10-E250-M012	11	5.7	<2	470	4200	4.8	24	52	<10	2.58	<2	<2	24	320
10-E250-M013	11	1.7	<2	470	4800	<2	24	41	24.44	120	<2	<2	26	330
11-V250-TR02	23	12	<2	1200	6600	5.4	56	50	<10	<2	<2	<2	36	750
11-W250-TR03①	34	20	<2	1700	12000	13	7	170	26	11.09	<2	<2	57	1300
11-W250-TR03②	42	20	<2	1900	10000	8.3	13	75	<10	2.058	<2	<2	57	1400
13-350-C01	42	20	<2	2200	9900	5.2	13	46	<10	3.06	<2	<2	41	1800
13-350-C05#1	30	14	<2	1400	8200	11	17	87	<10	490	<2	<2	36	1300
13-350TG5-M02-2	29	13	<2	1400	7600	5.2	16	40	<10	3.06	<2	<2	44	940
12-P350-M02①	31	15	<2	1500	8500	4.4	24	75	<10	2.864	<2	<2	38	1100
12-P350-M022	31	11	<2	1500	10000	<2	24	46	<10	6.266	<2	<2	40	1200

(3)	同位体
(- /	

ш <u>х, -</u> ди д	CI	³⁶ C	;I/CI	δ ³¹	⁷ Cl	δ	δD	δ ¹⁸ Ο		
サノノル名	mg/l	×1	0 ⁻¹⁵	%	, 00	‰		%		
07-V140-M01①	4200	1.8	±0.8	-1.44	±0.08	-44.9	±0.2	-2.9	±0.1	
07-V140-M01②	4200	2.5	±0.5	-1.77	±0.05	-44.8	±0.2	-2.6	±0.2	
07-V140-M01③	4100	N.M		N.M		-44.5	±0.3	-2.8	±0.1	
08-E140-C01#1	1400	5.2	±1.3	-1.57	±0.05	-63.1	±0.1	-7.2	±0.3	
08-E140-C01#3	1900	2.9	±0.5	-2.09	±0.09	-56.0	±0.1	-4.1	±0.3	
08-E140-C01#5	2900	3.0	±1.0	-1.42	±0.05	-46.4	±0.1	-3.0	±0.1	
09-V250-M02#1①	2100	3.3	±1.0	-0.99	±0.08	-62.4	±0.1	-7.0	±0.2	
09-V250-M02#12	2100	4.7	±0.6	-1.12	±0.06	-61.0	±0.4	-6.9	±0.1	
10-E250-M01①	1700	3.9	±1.1	-1.08	±0.05	-61.8	±0.2	-5.7	±0.1	
10-E250-M012	1700	2.6	±0.7	-1.32	±0.10	-57.9	±0.3	-5.8	±0.1	
10-E250-M01③	1600	N.M		N.M		-60.0	±0.4	-6.6	±0.2	
11-V250-TR02	3600	3.1	±0.7	-1.00	±0.10	-49.8	±0.0	-4.5	±0.0	
11-W250-TR03①	5400	2.6	±0.9	-1.11	±0.05	-41.0	±0.2	-1.3	±0.1	
11-W250-TR032	5600	3.2	±0.5	-1.50	±0.07	-38.9	±0.3	-0.9	±0.1	
13-350-C01	5800	3.1	±0.5	-1.24	±0.07	-36.8	±0.1	-0.5	±0.1	
13-350-C05#1	4400	4.1	±0.6	-0.95	±0.09	-41.7	±0.1	-1.4	±0.1	
13-350TG5-M02-2	4000	2.6	±0.5	-1.23	±0.07	-47.1	±0.3	-3.1	±0.1	
13-P350-M02①	4500	4.4	±0.6	-1.32	±0.10	-40.6	±0.1	-1.6	±0.1	
13-P350-M022	4400	N.M		N.M		-40.4	±0.3	-1.8	±0.1	

(4)希ガス

	計測値			補正値(N	le補正)	特記事項	
	⁴ He	³ He/ ⁴ He	Ne	⁴ He	³ He/ ⁴ He	採取方法、	採取期間、採取時の
	CCSTD/g.	-	CCSTD/g	CCSTD/g.	-	圧力など	
08-E140-C01#1①	4.1E-7	1.8E-7	2.3E-8	3.5E-6	1.8E-7		
08-E140-C01#12	3.9E-7	7.4E-8	4.1E-8	1.9E-6	7.4E-8	循環採取	29日間循環 1.1MPa
08-E140-C01#13	5.7E-5	1.4E-6	1.8E-4	コンタミ	コンタミ		
08-E140-C01 # 3①	1.2E-4	9.6E-8	1.0E-7	2.4E-4	9.6E-8	活理拉币	91日閏彽彊 0 0MD。
08-E140-C01 # 3②	1.1E-6	1.1E-7	1.0E-7	2.1E-6	1.1E-7	個 泉 休 収	21日间1/11 泉 0.9 MPa
08-E140-C01#5①	3.1E-7	1.1E-7	2.4E-8	2.5E-6	1.1E-7	活理抠币	20日間循環 0 6MP。
08-E140-C01#52	3.0E-7	1.4E-7	2.1E-8	2.8E-6	1.4E-7	11日來11木以	20日间7月來 0.01111
07-V140-M01	1.4E-8	2.7E-7	N. D	補正不可	補正不可	圧力制御	46日間 0.25MPa
07-V140-M03 #1①	3.4E-6	9.7E-8	1.5E-7	4.5E-6	9.7E-8	正力判御	25日問 0.45MDo
07-V140-M03 #12	5.2E-4	1.1E-7	5.6E-6	コンタミ	コンタミ	/工/) 前仰	25 H [H] 0.45MFa
10-E250-M01	3.2E-8	1.8E-6	1.4E-7	4.4E-8	1.8E-6	圧力制御	44日間 1MPa
09-V250-M02#1①	8.4E-8	6.5E-7	2.0E-8	8.2E-7	6.5E-7	活理拉币	20日間活費 0 2MP。
09-V250-M02#12	9.3E-8	7.8E-7	3.3E-8	5.6E-7	7.8E-7	11日來11不以	29日间70日來 0.5001 a
09-V250-M02#13	1.4E-8	1.7E-6	1.3E-7	2.2E-8	1.7E-6	活理拉币	17日閉循環 0 4MP。
09-V250-M02#1④	6.7E-8	8.1E-7	9.3E-8	1.4E-7	8.1E-7	11日來11木以	17日间阳禄 0.41111
09-V250-M02#15	N. D	1.5E-6	N. D	補正不可	補正不可	循晋拉币	30日問循環 0 4MP。
09-V250-M02#16	7.0E-8	7.8E-7	1.0E-7	1.4E-7	7.8E-7	11日來11木以	50日间//自來 0.4mia
09-V250-M02#1⑦	7.4E-8	6.3E-7	6.8E-8	2.2E-7	6.3E-7	活理拉历	44日問活費 0 4MP。
09-V250-M02#1®	9.0E-8	1.5E-6	9.0E-8	2.0E-7	1.5E-6	11日來11不以	44日间//自來 0.4MI a
13-350-C05 #1①	6.7E-7	1.5E-7	4.2E-8	3.2E-6	1.5E-7	活理拉币	15日問活瑨 1 GMP。
13-350-C05 #12	3.9E-7	7.7E-8	3.9E-8	2.0E-6	7.7E-8	11日來11不以	15日间11日來 1.01111
13-P350-M02 ①	6.7E-8	9.9E-7	1.1E-7	1.2E-7	9.9E-7	匡力判御	27日問 0.88MPa
13-P350-M02 ②	3.7E-8	1.1E-6	1.4E-7	5.4E-8	1.1E-6	ルーンノロリル中	JIHIJ U.OOMFA
13-350TG5-M02-2 ①	3.2E-7	1.8E-7	1.1E-7	5.9E-7	1.8E-7	压力制御	10日間 1 9MD。
13-350TG5-M02-2 (2)	3.1E-7	1.7E-7	4.7E-8	1.3E-6	1.7E-7	ルーンフロリル中	13 H [H] 1. 2MF a

7.3.3.5 考察

(1) ³⁶C1/C1 年代

a. 基本原理

塩素(以下 C1)は、化学的に安定で吸着性が低く、岩石中の含有量も少ないため、地下水のトレーサーとして一般的に利用されている。³⁶C1 はこの C1 の放射性同位体で、半減期が 30.1 万年であり、 古い地下水年代の評価に有効である(Philips, 1999)。

地下水年代において重要となる³⁶C1の起源は、大気中の Ar の核破砕反応によるものと、地中での³⁵C1の放射化によるものがある。

海水を起源とするような地下水では、地中でのUとThの放射壊変による中性子によって濃度が 上昇する。このため、³⁶C1/C1の上昇から地下水年代を評価する(Mahara et al., 2008)。 ³⁶C1による地下水年代測定は、地下水中の³⁶C1の濃度変化を以下のように考える。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\lambda C + M \tag{7. 3. 3-1}$$

ここに、Cは³⁶Cl の濃度、tは時間、 λ は崩壊定数(=ln 2/T)、Tは半減期で 30.1 万年、Mは原位 置での生成速度であり、生成速度は地盤中のウラン・トリウム濃度などに依存する。 上式を t=0 で $C=C_0$ の境界条件の基で解くと次式が得られる。

$$C = \left(\frac{M}{\lambda} - C_o\right) \exp(-\lambda t) + C_o$$
(7. 3. 3-2)

ここに、 C_{o} は³⁶C1の初期濃度である。ここでは、初期値に現海水を想定し、初期値が平衡値より も低い場合($C_{o} < M/\lambda$)を仮定している。

さらに時間について整理すると次式が導かれる。

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} \ln(\frac{C - C_{se}}{C_0 - C_{se}})$$
(7.3.3-3)

ここに、 τ は³⁶C1 年代、 C_{se} は平衡値(= M/λ)である。

³⁶C1 による地下水年代測定は、前述のように初期値と平衡値が場所により異なるため、これらを 把握する必要がある。

幌延地域では、地下水の C1 は海水を起源としており、原位置平衡値は次のように計算することができる。

b. 平衡値計算

³⁶C1 年代の評価(100 万年以上)では、原位置での平衡値が重要になる。これは、図 7.3.3-3 に示 すように、³⁶C1 年代が半減期に対して大きくなるにともない、平衡値に近づくためである。

³⁶C1/C1の平衡値を求める方法には、1)岩石に含まれる C1の ³⁶C1/C1 を計測、2)岩石の鉱物・元素

- 7-54 -

に基づいて放射化量を計算の2つの方法がある。1)の方法については、岩石コアを細分化し、十分 な回数洗浄し、C1の溶出がなくなってから、酸などによって岩石を溶解し内部に残存している C1 を集めて分析する方法が一般的である。しかしながら、岩盤内に含まれる C1 量は少なく、声問層 や稚内層のような海成の地層では、岩石中に存在したのか、間隙水が混入したのかの判断が難しい。 このためここでは、2)岩石の鉱物・元素に基づいて放射化量を計算する方法によって評価する。



図 7.3.3-3 ³⁶C1/C1 の時間変化と年代の関係 (海水を起源とする場合を想定)

岩石に含まれるウラン・トリウムによる(α, n)反応における中性子生成、各元素の中性子の吸 収 に基づいて、³⁶C1/C1の原位置平衡値を計算する。ウランやトリウムの放射壊変によって α 粒子(He) が生成し、これが周辺の軽元素とぶつかって、軽元素から中性子(n)が放出される。この中性子が さらに周辺の元素にぶつかって放射化を起こす。この中性子を吸収した元素の内、C1への中性子の 吸収量、すなわち ³⁶C1の生成量に着目することで ³⁶C1/C1 が計算できる。

Florkowski et al. (1992)は、中性子生成率(P:atoms/y·g)は、Andrew et al. (1986)による簡易 計算では以下のように表されるとしている。

 $P = P_{\mu}(d) + [U] \cdot (Y_{U} + F) + [Th] \cdot Y_{Th}$ (7. 3. 3--4)

ここに、 $P_{\mu}(d)$ はミューオンによる中性子生成率であり、地下 100m 以深では無視できる。[U]と [Th]は岩石内のUとThの含有量(ppm)、Fは²³⁸Uの即発核分裂における中性子生成率であり、含有 量 1ppm 当たりの岩石 1g 当たり年間の発生中性子数は 0.418 である。 Y_u と Y_{Th} はUとThの含有量 1ppm に対する軽元素との(α , n)反応における中性子生成率、言い換えると中性子イールド(atoms/y・g・ ppm)である。

Andrew et al. (1986)によれば、地中での中性子フラックスは、ウラン・トリウムによる中性子の 生成と各元素による中性子の吸収に基づいて以下のように計算できる。

- 7-55 -

$$\phi = \frac{P}{\sum \sigma_a / \rho} \tag{7.3.3-5}$$

ここに ϕ は中性子フラックス((atoms/ cm²・y)、 σ_a は巨視的吸収断面積(1/cm=cm²/cc)、 ρ は密度(g/cm³)である。

³⁶C1/C1 の平衡値は、C1 の中性子の吸収反応に着目することとなる。Lehmann and Lossli(1991) によれば、³⁶C1/C1 の平衡値は以下の式で計算できる。これは、岩石中の³⁶C1 の生成量は、岩石中の C1 量に比例するためである。

$$\frac{{}^{36}Cl}{Cl} = \phi \cdot 4.55 \cdot 10^{-5} \tag{7.3.3-6}$$

主要元素と微量元素の計測結果を表 7.3.3-2 に示す。主要元素は XRF、微量元素は岩石を酸で溶 解後に ICP-MS で分析した。また間隙水には海水組成の約半分を仮定した。これは幌延地区の地下 水の組成が海水の半分程度の溶存イオン量のためである。

これらの分析結果に基づいて計算した ³⁶C1/C1 の原位置平衡値を表 7.3.3-2 に示す。 ³⁶C1/C1 の平 衡値は、声問層で 4.0±0.3×10⁻¹⁵、稚内層で 6.6±0.6×10⁻¹⁵ であった。図 7.3.3-4 に示すように (α ,n)反応では, A1, 0, Si, Na, Mg の寄与が大きく、マクロ断面積では H, C1, Si の寄与が大き い。特に H と C1 の寄与が大きいことから、間隙率と間隙の水が原位置平衡値を決定するうえで重 要であると考えられる。

		声問層							稚内層				
		幌延東立坑 HE150m-1	幌延東立坑 HE150m-2	幌延東立坑 HE150m-3	幌延東立坑 HE200m-1	幌延東立坑 HE200m-2	幌延東立坑 HE200m-3	幌延東立坑 HE271m-1	幌延東立坑 HE271m-2	幌延東立坑 HE271m-3	幌延東立坑 HE301m-1	幌延東立坑 HE301m-2	幌延東立坑 HE301m-3
乾燥密度	Mø/m ³	1.02	1.03	1.02	1.01	1.02	1.01	1.27	1.30	1.29	1.33	1.33	1.34
間隙率	"	57.62	57.56	57.88	57.63	57.57	58.10	45.97	45.45	45.32	45.25	44.79	44.90
Si0,	%	70.50	70.50	71.30	72.50	72.60	72.60	75.00	75.40	75.10	72.30	72.90	72.40
TiO	%	0.46	0.46	0.47	0.44	0.44	0.44	0.40	0.40	0.39	0,45	0.45	0.45
A1.0.	%	10.25	10.25	10.35	9.61	9.61	9.62	8.61	8,63	8.62	9.76	9.85	9.78
Fo.0.	96	3 88	3 88	3 02	3 57	3 50	3 60	2.96	2 00	2 04	3 80	3 83	3 80
Mp0	/0 9/	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
MgO	%	1 42	1 42	1 45	1 22	1 22	1 22	1 20	1 21	1 19	1 41	1 43	1 42
CaO	%	0.53	0.53	0.54	0.43	0.44	0.44	0.46	0.46	0.45	0.48	0.48	0.47
Na ₂ 0	%	1.54	1.54	1.55	1.39	1.38	1.40	1.40	1.41	1.40	1.42	1.44	1.42
K_0	96	1 74	1 75	1 77	1 64	1 65	1 65	1 49	1 49	1 49	1 68	1 68	1 68
P.0	96	0.07	0.07	0.08	0.06	0.07	0.06	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07
Ig=1055	/0	7 98	7 80	7 90	7 41	7 42	7 40	6.74	6.80	6.74	6.00	7.06	6.98
1g 1035	/0 9/2	1.50	1.05	1.50	1.41	1.42	1.40	1 56	1.57	1 60	1 49	1.00	1 49
S	%	1.00	1.07	1.00	1.04	1.00	1.02	0.79	0.77	0.82	1.45	1.40	1.45
V	maa	92	96	93	88	81	86	74	74	75	89	87	83
Cr	ppm	80	80	80	80	70	70	70	70	70	80	70	70
Со	ppm	5.0	6.0	5.0	5.0	5.0	5.0	4.0	5.0	5.0	4.0	5.0	6.0
Ni	ppm	36	35	34	28	31	30	26	25	25	34	33	34
Cu	ppm	24	24	25	23	23	23	23	23	23	23	23	23
Zn	ppm	82	82	83	76	76	77	75	76	75	78	79	79
Ga	ppm	13	13	13	12	11	11	10	11	11	12	12	12
As	ppm	7.3	7.1	7.1	70	7.2	7.7	8.5	8.4	8.8	7.4	7.6	7.4
RD Sr	ppii	00	04	03	10	73	82	84	84	70	80	19	70
V V	ppm	91 16	95	93 16	14	10	14	14	14	14	15	15	14
Zr	ppm	100	110	110	99	90	95	90	90	91	100	100	98
Nb	ppm	7	7.5	7.3	7	6.6	6.7	6.2	6.3	6.4	7.3	7.1	6.8
Ba	ppm	310	330	320	300	280	300	280	280	280	310	300	300
Pb	ppm	11	13	13	13	10	10	11	7	10	11	13	10
В	ppm	320	290	320	290	290	290	190	190	150	230	210	210
Li	ppm	50	50	50	50	50	50	30	30	30	40	40	40
Be	ppm	0.6	0.61	0.6	0.63	0.57	0.61	0.6	0.55	0.57	0.61	0.67	0.63
II	ppm	4 2	4 4	4 2	1.3	0.8	3.9	4.3	4.3	4 4	5	4 9	4.6
Cd	maa	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Gd	ppm	2.8	3	2.8	2.7	2.5	2.7	2.4	2.5	2.4	2.8	2.8	2.7
Sm	ppm	3	3.3	3.3	3.1	2.9	3.1	2.7	3	2.9	3	3.1	3.2
Eu	ppm	0.69	0.71	0.76	0.67	0.63	0.66	0.65	0.61	0.65	0.64	0.66	0.59
Dy	ppm	2.8	2.8	2.8	2.5	2.5	2.5	2.2	2.5	2.4	2.6	2.6	2.5
Yb	ppm	1.6	1.5	1.6	1.5	1.4	1.5	1.3	1.4	1.3	1.6	1.6	1.5
Lu	ppm	0.26	0.26	0.25	0.24	0.23	0.23	0.23	0.24	0.24	0.25	0.25	0.24
г (С.)	auns/g•y	<u>ა.8</u> 2 2F–02	4.1 2.2E=0.2	ა. უ 2 2F–02	<u>ა.0</u> 2 1F–02	2.1F-02	3.0 2 1F-02	4.0 1 9E-02	4.0 1 9E-02	4.0 1 9E-02	2.0F-02	2.0E-02	2.1 2.0F-02
F	atms/cm ² · c	9.0F-06	9.5F-06	9.1F-06	8.4F-06	7.9F-06	8.2F-06	1.3E-02	1.3E-02	1.4F-05	1.6F-05	1.6F-05	1.5F-05
³⁶ CI/Clsc	асшолош Б	4 1F-15	4 3E-15	4 2F-15	3 8F-15	3.6E-15	3.8E-15	5.9E-15	6 0F-15	6.2E-15	7.2E-15	7.2E-15	6.7E-15
平均值	-			4.0±0	3E-15	0.02 10	0.02 10	0.02 10	0.02 10	6.5±0	.6E-15		0
⁴ He		1.28E-12	1.35E-12	1.29E-12	1.22E-12	1.15E-12	1.18E-12	1.98E-12	2.04E-12	2.08E-12	2.43E-12	2.43E-12	2.29E-12
平均值	cc _{STP} /g _w			1.3±0	1E-12					2.2±0	.2E-12		
³ He/ ⁴ He		4.6E-09	4.7E-09	4.6E-09	4.5E-09	4.5E-09	4.5E-09	4.0E-09	4.1E-09	4.1E-09	5.7E-09	5.7E-09	5.7E-09
平均值	_			4.6±0).1E-9					4.9±0	0.9E-9		

表 7.3.3-2 岩石の分析結果と³⁶C1/C1 平衡値の計算値



(2)マクロ断面積への寄与率

図 7.3.3-4 放射化解析への各元素の寄与率

c. ³⁶C1 年代の計算

³⁶C1 年代を計算した結果を表 7.3.3-3 に示す。³⁶C1/C1 年代の計算にあたっては式(7.3.3-4)の平 衡値を、声問層で 4.0±0.3×10⁻¹⁵、稚内層で 6.6±0.6×10⁻¹⁵ とした。これは表 7.3.3-2 に示すとお りである。初期値は海水の 0.5×10⁻¹⁵ とした(Argento et al., 2010)。ここでは、声問層での平衡 値を用いた場合と稚内層での平衡値を用いた場合の 2 つの場合について計算結果を示した。また、 計測値には誤差が大きいため、計測値から誤差を引いたもの、計測値、計測値に誤差を足したもの で式(7.3.3-3)から ³⁶C1 年代を計算した。計算結果からも明らかなように、計測誤差によってかな り大きく ³⁶C1 年代が変化する。これは、原位置平衡値は、堆積岩で間隙率が大きいため低い値とな っており、計測値も計測下限付近のためバラツキが大きくなっている。このため、³⁶C1 年代の変動 が大きくなっている。声問層では、³⁶C1 年代が無限となっている部分を 100 万年とすると平均的に は 66 万年の年代となる。この値は、半減期を 2 回程度経過したものと同程度で有り、現海水の値 よりも有意に高いと考えられる。

一方で、稚内層では³⁶C1年代は28万年程度となる。これは、稚内層での³⁶C1年代としては小さ

い値であり、声問層よりも若い水が稚内層内に存在することになる。稚内層の上部は割れ目が多く、 地下水が比較的流れやすい、立坑の掘削などにより声問層から地下水が流入していると考えると、 ³⁶C1/C1 が若くなる場合が考えられる。このため、立坑で採取した地下水の水素・酸素同位体比と、 ³⁶C1/C1 と水素酸素同位体比の関係とを調査した。立坑で採取した地下水の水素酸素同位体比とこれ までの広域調査用のボーリング孔で調査した結果を図 7.3.3-5 に示す。図からも明らかなように、 化石海水といわれている端成分に比べて、調査坑道ボーリングの地下水は有意に浅層水と混合して いると考えられる。

酸素同位体比が大きいほど水岩石相互作用が進んでおり、古い地下水と考えられるため、酸素同 位体比と³⁶C1/C1の関係を図 7.3.3-6 に示した。この図からもわかるように、酸素同位体比が大き いものほど³⁶C1/C1が大きい傾向があり、酸素同位体比が小さいものは、³⁶C1/C1が小さい傾向にあ る。このため、立坑の地下水は、酸素同位体比が小さく、混合が進んでいることから、流動性が高 く、稚内層での平衡値に比べて³⁶C1/C1が低くなっていると考えられる。

サンプルタ	C1	³⁶ C1/C1	声問層⊇	平衡値による ³	⁶ C1年代	稚内層平衡値による ³⁶ C1年代			
リンフル名	mg/l	$ imes 10^{-15}$	計測值-誤差	計測値	計測値+誤差	計測值-誤差	計測値	計測値+誤差	
07-V140-M01	4200	1.8 ± 0.8	67,000	270,000	480,000	37,000	110,000	190,000	
07-V140-M01	4200	2.5 ± 0.5	250,000	440,000	620,000	130,000	180,000	230,000	
08-E140-C01#1	1400	5.2 ± 1.3	1,500,000	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	∞	350,000	630,000	1,700,000	
08-E140-C01#3	1900	2.9 ± 0.5	340,000	570,000	880,000	160,000	220,000	290,000	
08-E140-C01#5	2900	3.0 ± 1.0	250,000	620,000	∞	130,000	230,000	380,000	
09-V250-M02#1	2100	3.3 ± 1.0	300,000	740,000	∞	150,000	260,000	420,000	
09-V250-M02#1	2100	4.7 ± 0.6	∞	∞	∞	390,000	500,000	660,000	
10-E250-M01	1700	3.9 ± 1.1	470,000	1,700,000	∞	210,000	360,000	580,000	
10-E250-M01	1700	2.6 ± 0.7	220,000	450,000	720,000	110,000	180,000	260,000	
11-V250-TR02	3600	3.1 ± 0.7	330,000	640,000	1,300,000	160,000	240,000	340,000	
11-W250-TR03	5400	2.6 ± 0.9	180,000	460,000	930,000	93,000	180,000	300,000	
11-W250-TR03	5600	3.2 ± 0.5	430,000	720,000	1,200,000	190,000	260,000	330,000	
13-350-C01	5800	3.1 ± 0.5	390,000	660,000	1,100,000	180,000	240,000	320,000	
13-350-C05#1	4400	4.1 ±0.6	810,000	∞	∞	290,000	380,000	500,000	
13-350TG5-M02-2	4000	2.6 ± 0.5	270,000	460,000	660,000	130,000	180,000	240,000	
13-P350-M02	4500	4.4 ± 0.6	1,300,000	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	∞	340,000	450,000	600,000	

表 7.3.3-3 ³⁶C1 年代の計算結果







図 7.3.3-6 ³⁶C1/C1 と酸素同位体比の関係

(2) ⁴He 年代

a. 基本原理

⁴Heは希ガスで化学的に安定であり、地盤中のウラン・トリウムの壊変によって生成する。⁴Heは、 大気では低濃度である。これは、⁴Heは質量が軽く、大気中では宇宙へと流出するためである。一 方で、地中では、岩石から生成したものが地下水に蓄積する。このため、この蓄積量に着目して地 下水年代を評価する。古い地下水ほど濃度が高くなるため、特に古い地下水年代の推定に有効であ る(馬原、1998)。

⁴Heによる地下水年代測定法は、蓄積量を蓄積速度で除して、地下水年代を評価する。このため、 地下水年代は、次式で与えられる。

$$\tau = \frac{D - D_{eq}}{M + F / nb}$$
(7.3.3-7)

ここに、 r は地下水年代、Dは地下水中の溶存⁴He濃度、D_{eq}は大気中での水への⁴Heの溶解平衡濃度(初期値)、Mは岩石からの生成速度、Fは帯水層外部からの⁴Heフラックス、nは間隙率、bは帯水 層厚、F/nbは外部からのフラックスによる帯水層内での⁴Heの蓄積速度を表す。

蓄積速度を推定する方法としては、①岩石からの生成速度と外部フラックスをそれぞれ評価して 蓄積速度を推定する方法、②他の指標、例えば³⁶C1年代との比較により岩石からの生成速度とフラ ックスを合わせた蓄積速度を推定する方法がある(馬原、2009)。

①岩石からの生成速度と外部フラックスをそれぞれ評価して蓄積速度を推定する方法では、⁴Heの岩石からの生成速度は、岩石中のウラン(U)とトリウム(Th)の量に依存し、以下のように与えられる(馬原、1998)。

$$M = \frac{(12.1 \cdot U + 2.9 \cdot Th)(1-n)\rho_r(1-L)}{1.0 \times 10^{14} \cdot n \cdot \rho_w}$$
(7.3.3-8)

ここに、Mは岩石からの生成速度(cc_{STP}/g_wy)、*U*はウランの含有率(ppm)、*Th*はトリウムの含有率 (ppm)、*n*は間隙率、 ρ_r は岩石の密度(Mg/m³)、 ρ_w は水の密度(Mg/m³)である。*L*は岩石のヘリウムの 保持率であり、0と考えられている。

外部からのフラックスは、Mahara and Igarashi (2003)や中田ほか(2006b)のように拡散係数と濃 度分布に基づいて評価できる場合もあるが、一般的には、推定が難しく帯水層が明確でない場合、 F/nbのように明確に分配されない可能性がある。

②他の指標、例えば³⁶C1 年代との比較により岩石からの生成速度とフラックスを合わせた蓄積速 度を推定する方法では、⁴He 濃度と³⁶C1 年代など他の年代指標との相関をとって蓄積速度を評価す る。この方法は、馬原・長谷川(2003)、長谷川ほか(2006)で実施されており、比較的簡単に蓄積速 度が評価できる。ただし、相関が成立する範囲については注意が必要である。

- 7-61 -

⁴He による地下水年代は、蓄積速度の推定が難しい場合があるため、半定量的な評価になることが多い。

b. 生成量計算

幌延地区の場合、生成速度は式(7.3.3-8)から表 7.3.3-2 のように計算できる。また、原位置で 生成しているヘリウムの³He/⁴He は、以下の様に計算できる。

³He の原位置生成は、⁶Li (n, α)³H 反応によって生成し、Tolstikhin et al. (1996)によれば、以 下の様に表される。

 ${}^{3}He_{pro} = 6.25 \times 10^{-10} F \cdot [Li]$ (7.3.3-9)

ここに、³He_{pro}は、³He の岩石からの生成速度(atoms/gy)、 F は中性子フラックス(atms/m²y)、

・(*Li*)はLiの反応断面積、[*Li*]はリチウムの含有量(ppm)である。

一方で、⁴Heの原位置生成は、Andrews(1985)によれば以下で与えられる。

$${}^{4}He_{pro} = 3.2106 \times 10^{6} [U] + 7.7632 \times 10^{5} [Th]$$
(7. 3. 3-10)

これらを組み合わせると

$$\left(\frac{{}^{3}He}{{}^{4}He}\right)_{pro} = \frac{6.25 \times 10^{-10} F \cdot [Li]}{3.2106 \times 10^{6} [U] + 7.7632 \times 10^{5} [Th]}$$
(7. 3. 3-11)

これらの式に基づいて、³He/⁴He を計算すると、表 7.3.3-2のように計算できる。

岩石からの⁴He の生成速度は、声問層で $1.3\pm0.1\times10^{-12} \operatorname{cc}_{STP}/g_wy$ 、稚内層では $2.2\pm0.2\times10^{-12} \operatorname{cc}_{STP}/g_wy$ 、程度であり、生成している ³He/⁴He は声問層と稚内層ともに概ね 5×10^{-9} である。

c. ヘリウムの起源と年代

ヘリウムの起源として代表的なものに、大気起源、岩石起源、マントル起源がある。これらは、 主に³He/⁴He で特徴付けられ、大気起源では 1.4×10⁻⁶、岩石起源では 10⁻⁸程度、幌延の場合には前 述のように 5×10⁻⁹、マントル起源では 10⁻⁵程度である。幌延地域での ⁴He と ³He/⁴He の関係を図 7.3.3-7 に示す。ここでは、広域調査ボーリングでの調査結果もあわせて示した。ヘリウムの蓄積 は、⁴He の増加に伴い、³He/⁴He が 1×10⁻⁶で蓄積が進む場合と、1×10⁻⁷で蓄積が進む場合とがある。 原位置で生成する ³He/⁴He は 5×10⁻⁹程度のため、マントル起源のヘリウムの影響を受けていると考 えられる。ただし、マントル起源の ³He/⁴He を 10⁻⁵程度とすると、³He/⁴He が 10⁻⁶~10⁻⁷となるため には、その混合率は 1~10%程度となる。これは、マントル起源の ³He/⁴He が地殻起源の ³He/⁴He に 比べて 3 桁以上も大きいため、マントル起源のヘリウムが少しでも混合すると ³He/⁴He が大きく変 化するためである。幌延地区では、場所による ³He/⁴He の変動が激しいが、これは地点によってマ ントル起源の He の混合率が異なるためであると考えられる。マントル起源のヘリウムが支配的で あれば、各地点での ³He/⁴He はほぼ同じになるはずであるが、³He/⁴He が異なった値を示すため、局 所的に混入しているものと考えられる。従って、マントル起源の He は混入しているが、主に原位 置生成によって蓄積していると考えられる。

マントル起源のヘリウムの寄与が小さいと考えられたため、⁴He の蓄積に基づいて、⁴He 年代を評価すると、生成速度が $10^{-12} \operatorname{cc}_{STP}/g_w$ 程度のため、⁴He 濃度が $10^{-7} \operatorname{cc}_{STP}/g_w$ 程度では 10 万年オーダー、 $10^{-6} \operatorname{cc}_{STP}/g_w$ 程度では 100 万年オーダーとなる。

希ガスの試料は循環式で採取したものと、圧力制御式で採取したものの2種類があり、循環式が 圧力制御式に比べて濃度が高い。詳細については後述するが、ここでは、循環式の結果に基づいて ^⁴He 年代を説明する。

研究坑道のボーリングから採取した地下水では、140m 坑道から掘削した E140-C01 孔では補正 ⁴He 濃度は 2×10⁻⁶ cc_{STP}/g_{*}程度のものが多く、声問層での蓄積速度 1.3±0.1×10⁻¹² cc_{STP}/g_{*}y を考慮す ると、数百万年程度の蓄積に相当すると考えられる。ただし、C1 濃度は数千 mg/1、 $\delta D \cdot \delta^{18}$ 0 も -40~-70‰・-3~-7.2‰と浅層水の影響を強く受けており、希釈されている可能性がある。250m 坑 道から掘削したボーリング孔の V250-M02#1 では2×10⁻⁷ cc_{STP}/g_{*}程度を示しており、これはE140-C01 に比べて 1/10 程度である。これは、声問層と稚内層の境界付近に高透水な部分が有り、この影響 で地下水の混合が進み He 濃度が低いものと考えられる。V250-M02#1 では、C1 濃度も 2000mg/1、 δ D・ δ^{18} 0 も-62‰・-7‰程度と化石海水に比べてかなり低いため、浅層水の混合の影響を強く受けて いると考えられる。350m 坑道から掘削した 13-350-C05#1 では補正 ⁴He 濃度は 2~3×10⁻⁶ cc_{STP}/g_{*} 程度となっている。この地点は稚内層のため、稚内層の蓄積速度を考慮すると蓄積年代は百万年程 度になる。13-350-C05#1 では、C1 濃度も 4400mg/1、 $\delta D \cdot \delta^{18}$ 0 も-41.7‰・-1.4‰程度と化石海水 の半分程度になっているため、浅層水の混合の影響を受けている可能性が高い。

このように、E140-C01 孔と 13-350-C05#1 では、有意に蓄積はしているものの、浅層水による希 釈の影響を受けている可能性がある。混合がある場合には、⁴He 年代測定原理に基づくとその場で 溜まったものではないため評価が難しい。一方で、混合の影響で⁴He 濃度が低下している場合には、 新しい地下水の混合の影響を受けており、流動性が高いと推定される。


図 7.3.3-7 ⁴He と ³He/⁴He の関係

7.3.4 幌延における地下水流動・物質移行解析

7.3.4.1 地下水流動·水質変化の概要

幌延深地層研究センターにおける地下施設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。立坑掘削の進捗を図7.3.4-1に示す(日本原子力研究 開発機構、2014)。また、立坑への湧水量を図7.3.4-2に示す(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200m³/日(2010/1/1時点)である。5年間程度継続したと考えると40万 m³の湧水量となり、これは間隙率を50%と考えると100m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。

声問層と稚内層の境界付近に透水係数が高い領域があり、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、図 7.3.4-2 に示す様に、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、2014)。

水圧低下は図 7.3.4-3 に示す様に、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、日本原子力研究開発機構, 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、声問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 401 m 区間では、350m 調査坑道における 13-350-C03 孔(仮称)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おり、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 7.3.4-4 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、声問層と稚内層の間のゾーンと F1 断層の掘削による湧水が、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。



図 7.3.4-1 立坑掘削の進捗



(2)東立坑の湧水量

図 7.3.4-2 湧水量の時間変化

図 7.3.4-3 立坑周辺のボーリング孔における水圧低下

(2)HDB-3 孔での水圧低下



(2)HDB-6 孔での水圧低下



(1)先行ボーリングでの水圧低下





図 7.3.4-4 立坑周辺での地下水湧出と水圧低下の概念図

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、湧水量に対 して、間隙率が大きいため、地下水流速が遅いためと考えられる。

7.3.4.2 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 な影響を与えた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 7.3.4-5 に示す。解析モデルは主要な地層と大曲断層をモデル化した。



(1)解析メッシュの全体図





図 7.3.4-5 解析に用いた FEM 解析メッシュ

7.3.4.3 解析条件

(1) 境界条件の設定

境界条件は、地表面を降雨境界、側面および底面を操上ほか(2008)や操上(2007)に記載されている HDB-1~11 孔の全観測区間の全水頭の観測値を元にクリギングを用いて推定したものを用いた。 (2) 物性値の設定

解析に用いた物性値は、表 7.3.4-1 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。

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 100m、横分散長 10m、分子 拡散係数 0m²/s とした。

地層名	透水係数 (m/s)	比貯留係数 (1/m)	間隙率 (%)
更別層	1.00×10^{-06}	1×10^{-06}	45
勇知層	$9.35 imes 10^{-10}$	1×10^{-06}	45
声問層	$6.46\! imes\!10^{-09}$	1×10^{-06}	50
F1断層	$1.00 imes 10^{-06}$	1×10^{-06}	50
稚内層上部	$5.89 imes 10^{-10}$	1×10^{-06}	40
稚内層下音	$5.89 imes 10^{-10}$	1×10^{-06}	40
増幌層	$5.00 imes 10^{-11}$	1×10^{-06}	10
大曲断層	$1.00 imes 10^{-07}$	1×10^{-06}	30

表 7.3.4-1 解析に用いた物性値

7.3.4.4 解析結果

(1) 定常解析結果

地表面境界条件に与える涵養量を決定するため、地表面の涵養量の異なるケースについて掘削前の定常計算を実施した。涵養量は20、50、100、200mm/年の4ケースを実施した。解析結果として、 解析領域内に存在する HDB-1、HDB-3、HDB-6、HDB-8 での観測値と解析値の全水頭について図7.3.4-6 に鉛直プロファイルを示す。

対象地点の透水性が全体に低く、掘削前の定常状態の計算では涵養量が解析領域内の圧力分布に 及ぼす影響が小さいため、涵養量は100mm/年を用いることとした。



図 7.3.4-6 涵養量の感度解析結果

側面・底面の境界条件が全水頭分布に与える影響を感度解析により調査した。ここでは、地表面 に前述の涵養量100mm/年を設定し、側面および底面の境界を①不透水境界、②地表面標高から静水 圧分布とした静水圧境界、③広域の地下水流動解析結果を元に設定した圧力既知境界、④HDB-1~ 11 の観測値からクリギングを用いて圧力分布を設定した圧力境界の4ケースについて解析を実施 した。解析値を実測値と比較したものを図7.3.4-7に示す。この結果、クリギングで推定した圧力

- 7-71 -

境界が、解析値と実測値の整合性が最も高いため、この境界条件を以後の解析で用いることにした。



図 7.3.4-7 境界条件の感度解析結果

立坑掘削状態の地下水流動解析は、①立坑、140m 調査坑道、250m 調査坑道、350m 坑道を大気圧 開放(圧力水頭 0m で固定)した大気圧開放モデル、②換気立坑、東立坑のウォーターリングの平 均流量を流量既知境界条件とした WR 流量モデル、③250m 調査坑道に 100m³/日、350m 調査坑道に 200m³/日の流量を割り振った流量簡易モデルの3ケースを実施した。境界条件の概念図を図7.3.4-8 に示す。また、掘削前の初期水位は、境界条件と同様に、HDB-1~11 の観測データを基にクリギン グで推定して与えた。





立坑掘削の解析では、立坑を 350m まで掘削した状態での定常解析を実施した。ボーリング孔で の観測値と解析値とを比較した結果を図 7.3.4-9 に示す。ボーリング孔での水圧低下の比較結果で は、大気圧解放では、実測値と解析とがおおむね一致している。ウォーターリング流量モデルは PB-V01 孔内の稚内層上部で非常に大きな水圧低下となっている。また、そのほかの地点では実測値 に比べて解析値の水圧低下が小さい。流量簡易モデルは、水圧低下の解析値が実測値に比べて非常 に大きい。立坑周辺での水圧低下は、換気立坑と東立坑を通る断面で水圧低下を図化した。



(1)ボーリング孔での水圧低下の比較結果

(赤の棒線は、実測値での水圧低下を示す。水位は時間的に低下しているため範囲を示した)



⁽²⁾ 立坑周辺での水圧低下

地下水の定常解析、圧力低下の整合性の良かった大気開放モデルを用いて、F1 断層の有無につい て検討した。この結果を図 7.3.4-10 に示す。ボーリング孔の圧力分布では F1 断層を中心に圧力低 下していることが確認できる。また、立坑周辺での水圧低下から、F1 断層にそって水圧低下が大き い領域が広がっているのがわかる。

図 7.3.4-9 立坑掘削状態の境界条件による感度解析



(1)ボーリング孔での水圧低下の比較結果



⁽²⁾ 立坑周辺での水圧低下

図 7.3.4-10 F1 断層の有無による感度解析

断層、地層の透水係数が水圧低下に与える影響を確認するために、前述の表 7.3.4-1 の物性値を 基準として、F1 断層の透水量係数、声問層、稚内層上部の透水係数の値を 1/10、10 倍にして感度 解析を実施した。なお、境界条件は大気圧解放モデルを用いた。この結果を図 7.3.4-11 に示す。

声問層の透水係数を下げた場合には、水圧低下の範囲は拡大し、上げた場合には、水圧低下の範囲が狭まっている。F1 断層と、稚内層では、透水係数を下げた場合には、水圧低下の範囲が狭まり、 透水係数を上げた場合には、範囲が広がっている。これは、声問層は、F1 断層や稚内層に地下水を 供給する地層であり、透水係数が小さいほど供給量が不足し全体に水圧低下が大きくなり、透水係 数が大きいほど供給量が十分なため、水圧低下が小さくなると考えられる。F1 断層と稚内層では、 透水係数が小さいほど声問層からの供給量が十分なため、水圧低下範囲が小さくなり、透水係数が 大きいほど、供給量が必要なため、水圧低下範囲が大きくなるものと考えられる。

また、感度解析時の地表面、側面、底面からの地下水の流入率を図 7.3.4-12 に示す。これらの 結果は、地表面、側面、底面にそれぞれ濃度 1、それ以外を濃度 0 として計算したものである。

- 7-75 -



(1)ボーリング孔での水圧低下の比較結果



(2) 立坑周辺での水圧低下

図 7.3.4-11 透水係数の感度解析(水圧低下)



(1) ボーリング孔での各境界からの地下水の流入率



(2) 立坑周辺での地表水の流入率

図 7.3.4-12 透水係数の感度解析(地下水の流入率)

各地下水の混合率を計算すると100%を超えている部分もあるが、これは、各計算を個別に実施し ており、それぞれの収支を考慮していないためである。定常状態では、地表からの流入だけでなく、 側面からの地下水の流入も多くなっている。これは、地表面が流量固定境界条件であり、一定流量 以上の地下水が供給されないためである。声問層では、地表からの地下水の流入が顕著である。声 問層の透水係数が大きい場合、地表面からの地下水の供給だけでは不十分になり、側面からの地下 水の流入率が増える。F1 断層など局所的に高透水な部分では、側面からの地下水の流入が多くなる。

このように、定常解析では地表からの地下水の流入が顕著になる。浅部の声問層では、透水係数の変化によって地下水の流入経路が変化しているが、F1 断層や稚内層上部層では、透水係数が変化してもそれほど流入する地下水の組成は変化していない。

(2) 非定常計算結果解析

非定常的な水圧低下や地表水の流入を調査するために、立坑の掘削状況の変化を考慮した地下水 流動解析を実施した。非定常解析ではΔtを7日に設定し、立坑掘削のタイミングに合わせて、2006 年4月1日~2012年3月31日の期間(313ステップ)を実施した。降雨量は100mm/年、側面・底 面境界はクリギングでの推定値固定境界、立坑・調査坑は掘削工程に合わせた大気開放(圧力水頭 0m)での圧力既知境界に設定した。これらの解析条件は、定常解析の整合性がもっとも高かった場 合を設定している。

解析結果として立坑・調査坑掘削過程の流量の時系列変化を図 7.3.4-13、ボーリング孔での水位 変化を図 7.3.4-14、立坑周辺での 2007/07/14、2009/10/03、2011/08/13、2012/03/31 時点での水 圧低下を図 7.3.4-15 に示す。

図 7.3.4-13 の立坑への地下水の湧水量の解析値は、立坑に大気開放を設定しても実測値の 1 割 程度であった。大気解放条件は、もっとも地下水の湧水量が多くなる境界条件であるが、湧水量の 解析値が少ないことから、透水係数は設定よりも 1 桁程度大きいと考えられる。図 7.3.4-14 のボ ーリング孔での水位変化は、おおむね傾向は再現できているものの、水圧低下の解析値は実測値に 比べて反応が早くなっている。このため、貯留係数については、もう少し大きい値を用いる必要が あると考えられる。図 7.3.4-15 の立坑周辺で有意に水圧低下が発生しているものの、定常状態で の水圧低下に比較すると、水圧低下自体とその範囲が狭い。このため、これから時間とともに徐々 に増加していくと考えられる。図 7.3.4-16 の立坑周辺での地表水の流入では、浅部で少し地表水 の流入は見られるもののそれほど顕著ではない。ただし、湧水量の解析値は、実測値の 1/10 程度 にとどまっており、これを考慮するともう少し大きくなるものと考えられる。声問層は間隙率が大 きいため、地下水量も多く、流速も遅いため地下水の動きは遅いものと考えられる。



図 7.3.4-13 立坑・調査坑掘削過程の流量の時系列変化



図 7.3.4-14 立坑周辺のボーリング孔での水位変化



図 7.3.4-15 立坑周辺での水圧低下



図 7.3.4-16 立坑周辺での地表水の流入

7.3.4.5 考察

立坑などの掘削に伴う地下水流動・物質移行現象を評価するために、地下水流動解析を実施した。 地下水流動の定常解析では、地表面境界条件、側面および底面の境界条件について感度解析を行い、 地表面の涵養量 100mm/y、側面・底面の境界条件は既存の水圧観測値からクリッギングで推定したも のを用いることとした。声問層の透水係数が大きい場合、声問層を介した地表面からの地下水流入と なり、透水係数が小さい場合、側面からの地下水の流入となるため、水位の低下傾向も大きく変化す ることがわかった。非定常解析では、立坑の境界条件を定常解析において水圧低下の整合性が高かっ た圧力既知境界条件を用い、立坑などの建設にともなって圧力を大気開放条件とする形式で実施した。 この結果、水圧の低下傾向は概ね再現することができた。ただし、湧水量の解析値は実測値を 10%程 度であること、水圧応答が激しいことから、透水係数、貯留係数ともにより大きい方が実測値を再現 できると考えられた。今後、F1 断層の透水係数や声問層と稚内層の境界など、湧水量が多かった地点 について、透水係数や貯留係数などモデルの変更を検討していく必要がある。立坑掘削に伴う水質の 変化も解析したが、地表からの地下水の流入は有意でなかった。これは、勇知層の間隙率が大きく、 実流速が遅いためと考えられる。ただし、現状の解析モデルでは湧水量が過小に評価されているため、 湧水量が適正な場合の変換について、今後検討していく必要がある。

7.3.5 まとめと今後の課題

研究坑道における地下水調査では、瑞浪超深地層研究所、幌延深地層研究センターで地下水水質と 地下水年代を調査するとともに、研究坑道掘削に伴う地下水流動・物質移行現象の評価を行った。

瑞浪での調査では、これまでの調査結果に基づいて水質・地下水年代分布の変化を評価した。地下 水年代指標、⁴He と³He/⁴He や C1 と ³⁶C1/C1 では、研究坑道で採取した地下水は概ねボーリング孔で予 測された地下水と同じ特徴を有することが確認できた。このため、研究坑道周辺での地下水は、流出 域の地下水の特徴を有していることが確認できた。ただし、HCO₃ と ¹⁴C や δ D と δ ¹⁸0 では、研究坑道 の掘削に伴って、浅層水と深層水との地下水の混合が進んでいることも確認できた。浅層水の混合指 標となる ³H、 δ D などの変化や深層水の混合指標となる C1 や ⁴He の変化について、ここ数年では、そ れほど大きく変化していないことがわかった。浅層水の混合率は、200m ステージ、300m ステージのボ ーリング孔(07MI07 孔、09MI20 孔)では 30%までで進んでいるが、400m ステージのボーリング孔(10MI26 孔)では 20%程度、深度 300m のボーリング横坑(13MI37 孔)では 10%、アクセス坑道の先の 09MI21 孔で は 10%以下、と場所によって異なり、立坑周辺で主に浅層水の混合が進んでいることが確認できた。 浅層水の混合は今後も進むことと考えられるため、これらを継続して調査することにより、その変化 を把握するとともに、それらを利用した地下水流動の評価につなげていくことを考えている。

このような研究坑道の掘削に伴う変化を評価するために、地下水流動・物質移行現解析を実施した。

立坑の境界条件、断層と地層の透水係数の感度解析、断層の存在影響、瑞浪層群の異方性の影響など、 種々の影響について、定常解析により検討した、この結果、実測値に基づいた流量既知境界条件が過 剰な水圧低下とならないため適切であること、断層の存在とその物性値が、水圧低下や浅層水や深層 水の流入において重要であることが明らかとなった。トンネル掘削の状況を模擬した非定常解析も実 施したが、深層水の流入傾向は再現できるものの、水圧低下が過大かつ浅層水の流入が再現できてい ない。このため、透水係数の見直しや、浅層水の流入を再現できるような透水係数の設定や初期分布 について検討する必要がある。

幌延での調査では、これまでの調査結果に基づいて、立坑の研究坑道内から採取した地下水について、³⁶C1年代と⁴He年代の評価を行った。

³⁶C1年代の評価では、原位置平衡値を岩石の物性値に基づいて計算し、³⁶C1/C1の実測値に基づいて ³⁶C1年代を算出した。声問層内では、地下水の³⁶C1/C1は原位置平衡値に近く古い地下水と推定された。 ただし、声問層の原位置平衡値が小さいため、測定誤差の影響で若く評価される場合も散見された。 一方で、稚内層では、地下水の³⁶C1/C1は原位置平衡値よりも有意に低く、数十万年程度の³⁶C1年代 となった。また、立坑内の稚内層から採取した地下水は、ボーリング孔の稚内層から採取した地下水 に比べて、水素・酸素同位体比が有意に低く、流動性が高いと考えられた。これらは、声問層と稚内 層の境界の流動性の高い地下水、あるいは、浅層地下水との混合が進んでいると推定された。

⁴He 年代の評価では、声問層内では数百万年程度の⁴He 年代となったが、より深部では若い年代となった。これは前述のように、稚内層と声問層の境界に流動性の高い地下水が存在する、あるいは、浅層地下水との混合が進んでいる影響と考えられた。

これらの結果から、立坑周辺では声問層では、³⁶C1/C1 が平衡に達し、⁴He の蓄積も進んでおり、地 下水年代が古い(100 万年以上)と推定された。一方で、稚内層では流動性が高く、浅層水との混合が 進んでいる影響で、ボーリング孔での結果に比べて地下水年代が若いと推定された。

これまでの結果を確認するために、引き続き地下水調査を実施する。これまでの調査は、ボーリン グ孔から採取した流動性の高い地下水が対象であったため、岩石コアでも同様の結果が得られるかな 確認していく必要がある。また、⁴He 濃度の評価では、採取時に脱ガスを起こしており、この対策に ついて検討する必要がある。

幌延深地層研究センターの立坑などの掘削に伴う地下水流動・物質移行現象を評価するために、地 下水流動解析を実施した。地下水流動は定常状態の感度解析結果に基づき、地表面の涵養量100mm/y、 側面・底面の境界条件は既存の水圧観測値からクリッギングで推定したものを用いることとした。非 定常解析では、立坑の境界条件を定常解析において水圧低下の整合性が高かった圧力既知境界条件と して実施した。この結果、水圧の低下傾向は概ね再現することができた。ただし、湧水量の解析値は 実測値の10%程度であること、水圧応答が激しいことから、透水係数、貯留係数ともにより大きい方 が実測値を再現できると考えられた。今後、F1 断層の透水係数や声問層と稚内層の境界など、湧水量 が多かった地点について、透水係数や貯留係数などモデルの変更を検討していく必要がある。立坑掘 削に伴う水質の変化も解析したが、地表からの地下水の流入は有意でなかった。ただし、現状の解析 モデルでは湧水量が過小に評価されているため、湧水量が適正な場合の変化について、今後検討して いく必要がある。 7.4 天然トレーサーの調査

7.4.1 希ガス採水方法

坑道内で溶存ガス分析用の地下水を採取する際には、圧力低下による脱ガスを起こす可能性がある。 前節でも示したように、特に溶存ガスを多く含む地下水では脱ガスによって適切に溶存ガス量を評価 できない場合がある。このため、溶存ガスを採取する方法を検討している。

溶存ガスの採取方法としては、圧力制御式、循環式、原位置平衡式が代表的と考えられる。圧力制 御式、循環式については、それぞれ瑞浪での採水と幌延での採水で実施している(図7.3.3-2参照)。 圧力制御式については、瑞浪での調査結果から比較的流量が多い地点には適用性が高い。循環式は幌 延での採水に適用しているが、まだバラツキが大きい。このため、原位置平衡式の溶存ガス採取方法 について検討を開始した。原位置平衡式サンプリングは、Seldon et al. (2003)により考案された方法 であり、サンプリング装置はDiffusion sampler と呼ばれ、ガス透過性のメンブレン、スライド式バ ルブ、銅管という構成になっている。図7.4.1-1 は同時に2つのサンプルをとる際のサンプラーの写 真である。このサンプラーをボーリング孔などに挿入し、メンブレンを通じて銅管と外部との希ガス 濃度が平衡に達するのを待つ。その後、スライド式バルブを作動させメンブレンと銅管との連結を切 断する。この状態でサンプラーを回収し、地上で銅管をクランプする方法である。一般的な銅管に地 下水を流してとる方法に対して、平衡になるのを待ってから試料を採取するため Passive sampling などとも呼ばれている。

ここでは、この原位置平衡式サンプラーについて平衡に到達する時間などを検討するために、実施 した室内試験と原位置に適用した結果について説明する。

7.4.1.1 原位置平衡式サンプラーの室内試験

原位置平衡式サンプラーでは、メンブレンを通して地下水中のガスとサンプラーのガスとが十分に 交換する必要がある。メンブレンを介してのガスの輸送は拡散で起こると考えられており、素材の拡 散係数(透気係数)と厚み、サンプラー内の体積などに依存する。このため、使用したメンブレンの素 材や溶存ガスとの交換にどの程度の時間がかかるかを検討しておく必要がある。また、交換にかかる 時間は、サンプラーを取り出した後に、どの程度の時間で試料が大気によって汚染されるかというこ とを知る上でも重要である。

(1) 試験方法

原位置平衡サンプラーを試作するには、メンブレンの素材を選定する必要がある。メンブレンは 透過性が大きいほど、厚みが薄いほど交換が早くなる。素材の透過性はよく調べられており、シリ コンゴムや天然ゴムの透過性が高いことが知られている。サンプラーでは取り扱いが簡単かつ安価 で手に入れられるとの観点からシリコンチューブをメンブレンとして使用することとした。

- 7-84 -

試作したサンプラーの写真を図 7.4.1-2 に示す。サンプラーは、バルブと 6mm の銅管を接続し、 その銅管に外径 8 mm、内径 6 mm のメンブレンを被せ、オーリングでシールする形態とした。シリ コンチューブ自体は強度がないため、シリコンチューブ内にはバネを入れている。これは、大気に よる汚染を防ぐためにサンプラー内を真空引きした際に、シリコンゴムが変形し、切れ目などが入 るのを避けるためである。原位置で使う際には、外側にカバーを付けるなど補強をすべきと考えら れる。

平衡になる時間を調査するために、シリコンゴムを介したガスの交換試験を実施した。試験の系 を図 7.4.1-3 に示す。試験系はサンプラー、圧力計測装置、真空ポンプで構成される。試験手順を 以下に示す。

① 真空ポンプ、サンプラー、圧力計を接続する。

- 真空ポンプでサンプラー内の大気を排除する。
- ③ 大気を排除したことを圧力計で確認し、真空ポンプ側のバルブを閉じる。

④ サンプラー内の圧力を計測し、交換がどの程度の速度で起こっているかを調べる。

室内試験は、水中と大気中とで実施した。水中はサンプラーを水槽に浸漬し、メンブレン部分が 水没する状態で試験をした。一方、大気の場合は、サンプラーは机上に安置した。



図 7.4.1-1 原位置平衡式サンプラーの概念図 (ゴムバンドの部分をクランプなどで締めて採取)



図 7.4.1-2 試作した原位置平衡式サンプラー



図 7.4.1-3 原位置平衡式サンプラーによる室内試験写真

(2) 試験結果

サンプラー内の圧力変化を図 7.4.1-4 に示す。サンプラー内の圧力変化は、ガスがメンブレンを通 してサンプラー内に流入したために発生していると考えられる。試験終了後にサンプラー内を確認し たが、水の流入はなく、溶存ガスがメンブレンを通して流入したために、圧力が大気圧まで回復した と考えられる。

圧力の経時変化は、水中の場合も大気中の場合も時間とともに対数的に大気圧に近づいていること がわかる。これは、メンブレンを通して拡散により大気が浸入するためである。理論的には、大気が メンブレンを通して拡散で流入すると仮定すると、サンプラー内へのフラックスは以下で与えられる。

$$F = -D\frac{\partial P}{\partial x} = -D\frac{Pa - Ps}{L}$$
(7.4.1-1)

ここに、Fはフラックス、Dはゴムの拡散係数、Pは圧力であり、Paは大気圧、Psはサンプラー内の圧力、Lはメンブレンの厚みである。

圧力の時間変化は次式で表される。

$$V\frac{\partial Ps}{\partial t} = -DA\frac{Pa-Ps}{L}$$
(7.4.1-2)

ここに、Vはサンプラーの体積、Aはメンブレンの表面積である。

上式を積分すると次式が得られる。

$$\log(Pa - Ps) = -\frac{DA}{VL}t + C_1 \quad (\frac{\partial Ps}{Pa - Ps} = -\frac{DA}{VL}\partial t)$$
(7.4.1-3)

ここに、C₁は積分定数である。

初期状態を t=0; Ps=0 とすると、C₁=log Pa となり次式が得られる。

$$\log(Pa - Ps) = -\frac{DA}{VL}t + \log Pa \tag{7.4.1-4}$$

展開すると次式になる。

$$Pa - Ps = Pa \cdot \exp(-\frac{DA}{VL}t) \quad (Pa - Ps = Pa \cdot \exp(-\frac{DA}{VL}t)) \quad (7.4.1-5)$$

サンプラー内の圧力と大気との差圧がフラックスの起動力となるため、上式で圧力変化は表される。 この式は、放射性物質の放射壊変による濃度変化と同じであり、DA/VL が壊変定数、ln(2)VL/DA が半 減期に対応する。このため、圧力が(Pa-Ps)/2Pa になる時間がわかれば、その 5 倍程度の時間で (Pa-Ps)/Pa は 1/2⁵ になる。

実験では、交換に寄与するメンブレンの幅を変えて、試験を実施した。

サンプラーの実験の結果から、水中ではメンブレン幅が 3.5 cm で交換が半分進むのにかかる時間 (半減期)が3.5 日、幅が10cm で半減期が0.9 日程度であった。メンブレン幅が3倍になると半減期が ほぼ3倍程度になっている。大気中で試験を実施した場合もほぼ同じ傾向で、メンブレン幅が3.5cm では0.37 日、幅が10cm では0.16日であった。



図 7.4.1-4 サンプラー内の圧力変化

大気中でのメンブレンを通したガス移行速度が大きかったことから、He のリーク試験を実施した。 原位置でサンプルを採取した場合、サンプラー内のガス圧は、水圧と同程度まで増加し、圧力が大 きくなることにより漏出しやすくない。また、He は単原子であり漏出しやすいため、He ガスを用 いて試験を実施した。 試験条件は、サンプラー内に He を大気圧よりも高い圧力で注入し、その 流出を圧力の計測により求めた。メンブレン幅は 3.5cm で試験を実施した。この結果を図 7.4.1-5 に示す。He ガスでは、空気の場合よりも半減期が大きく 0.2 日程度となった。



図 7.4.1-5 He ガスの漏気試験

上記のように、メンブレン幅を3.5cm に設定した場合、17.5日(半減期の5倍)程度安置すれば、ほぼ交換が終了し、回収後は1時間以内(He ガス漏気試験の半減期の1/5倍)で封入すれば、適切にサン プルをとることができると考えられた。上記のように、シリコンチューブ(外径8mm、内径6mm)を用い ると、原位置平衡に達する時間、回収後バルブを閉めるなどの作業時間を鑑みても、十分にサンプリ ングが実施できると考えられた。

7.4.1.2 サンプラーの原位置への適用

圧力制御式と循環式サンプラーを幌延超深地層研究センターの坑道内ボーリングに適用した。

圧力制御式での採取状況を図 7.4.1-6 に示す。圧力制御式では、微少な流量を流し、下端をやや高 くして設置し、ガスが抜け易い様にしたが、バルブ部分にガスが溜まる場合があった。このため、設 置はしたものの銅管内に地下水がない場合があり、この場合については計測していない。

循環式での採取状況を図 7.4.1-7 に示す。循環式は JAEA 設置の循環装置を利用して採取した。循 環式では、ボーリング孔からの配管がビニールチューブのため、循環時間に伴い希ガスの濃度が変化 する可能性がある。このため、09-V250-M02#1 では、時間的に循環時間を変えて採取を実施した。具 体的には、循環経路に当初 6 本の銅管を設置し、2 週間毎に銅管を 2 本ずつサンプリングした。希ガ スの分析結果は、7.3.3 節に示した通りであるが、ここでは、圧力制御式と循環式に分けて、表 7.4.1-1 に示す。

圧力制御式での採水結果は一部に空気とのコンタミなどもあるが、概ね Ne 濃度が 1×10⁻⁷ cc_{STP}/g_w 程度と、大気平衡値に近い値 (2×10⁻⁷ cc_{STP}/g_w)を示しており、従来の 1×10⁻⁹ ~10⁻⁸ cc_{STP}/g_w程度と比 べると脱ガスの影響は小さくなっている。ただし、⁴He 濃度の再現性はそれほど高くなく、計測値は 同一条件で採取したサンプルでも 1/2~2 倍程度の差が生じている。³He/⁴He については、13-P350-M02 や 350LGE-M01 を見ても脱ガスしてもそれほど大きく変動していない。

循環式での採水結果は、1×10⁻⁸ ~10⁻⁷ cc_{STP}/g_{*}程度であり、圧力制御式に比べてやや脱ガスが大き い傾向にある。⁴He 濃度のバラツキは圧力制御式よりもやや良い様に見える。V250-M02#1 で時間的な 変化を調査した。V250-M02#1①②は、時間変化を調べる前に採水を実施したものである。V250-M02#1 ③~⑧は、循環開始時には 6 本の銅管を接続し、2 本ずつ銅管を採取して時間的な変化を見たもので ある。③④、⑤⑥、⑦⑧は同時に採取したものである。⁴He 濃度の時間的な変化を調べたもの(③~⑧) は、その前に採取したもの(①②)に比べて有意に低い。③~⑧については、³He/⁴He についてもバラツ キが大きい結果となっている。250m 坑道付近は、声問層と稚内層の境界に当たり、地下水の流動が大 きいところのため、濃度が変化した可能性もあるが原因は不明である。今後別地点でも時間変化を調 査する必要がある。

	計測値		補正値(Ne補正)		特記事項			
	⁴ He	³ He/ ⁴ He	Ne	⁴ He	³ He/ ⁴ He	採取方法、	採取期間、	採取時の
	CCSTP/gw	-	CCSTP/gw	CCSTP/gw	-	圧力など		
07-V140-M01	1.4E-8	2.7E-7	N. D	補正不可	補正不可	圧力制御	46日間 0.	25MPa
07-V140-M03 #1①	3.4E-6	9.7E-8	1.5E-7	4.5E-6	9.7E-8	正力判御	御 25日間 0	45MDo
07-V140-M03 #12	5.2E-4	1.1E-7	5.6E-6	コンタミ	コンタミ	ノエノノ「叩」「岬	20 H H U.	40MI a
10-E250-M01	3.2E-8	1.8E-6	1.4E-7	4.4E-8	1.8E-6	圧力制御	44日間 1M	Pa
13-P350-M02 ①	6.7E-8	9.9E-7	1.1E-7	1.2E-7	9.9E-7	「十年」の	37日間 0.8	88MPa
13-P350-M02 ②	3.7E-8	1.1E-6	1.4E-7	5.4E-8	1.1E-6	圧力前卿		
13-350TG5-M02-2 ①	3.2E-7	1.8E-7	1.1E-7	5.9E-7	1.8E-7	工力判御	10日門 1	1.2MPa
13-350TG5-M02-2 ②	3.1E-7	1.7E-7	4.7E-8	1.3E-6	1.7E-7	/エノノ 市小岬	19日间 1.	
08-E140-C01#1①	4.1E-7	1.8E-7	2.3E-8	3.5E-6	1.8E-7		盾環採取 29日間循環 1.	
08-E140-C01#12	3.9E-7	7.4E-8	4.1E-8	1.9E-6	7.4E-8	循環採取		1.1MPa
08-E140-C01#13	5.7E-5	1.4E-6	1.8E-4	コンタミ	コンタミ			
08-E140-C01 # 3①	1.2E-4	9.6E-8	1.0E-7	2.4E-4	9.6E-8	活理拉而	91日閉循環	0 OMPo
08-E140-C01 # 3②	1.1E-6	1.1E-7	1.0E-7	2.1E-6	1.1E-7	個來1本収	21日间1/目块	U. 9MF a
08-E140-C01#5①	3.1E-7	1.1E-7	2.4E-8	2.5E-6	1.1E-7	活理拉而	骨抠顶 20日間循環 0.60	0 GMDo
08-E140-C01#5②	3.0E-7	1.4E-7	2.1E-8	2.8E-6	1.4E-7	個來1本収	20日间11日块	0. OMF a
09-V250-M02#1①	8.4E-8	6.5E-7	2.0E-8	8.2E-7	6.5E-7	活理拉而	90日閉循環	0 2MDo
09-V250-M02#12	9.3E-8	7.8E-7	3.3E-8	5.6E-7	7.8E-7	個來1本収	29日间11日块	0. SMF a
09-V250-M02#13	1.4E-8	1.7E-6	1.3E-7	2.2E-8	1.7E-6	油理切历	17日閉須彊 0 400	0_4MDo
09-V250-M02#1(4)	6.7E-8	8.1E-7	9.3E-8	1.4E-7	8.1E-7	個來1本収	11日间/旧块	U. HMF'A
09-V250-M02#15	N. D	1.5E-6	N. D	補正不可	補正不可	循環採取	30日間循環	0_4MDo
09-V250-M02#16	7.0E-8	7.8E-7	1.0E-7	1.4E-7	7.8E-7			U. HMF a
09-V250-M02#1⑦	7.4E-8	6.3E-7	6.8E-8	2.2E-7	6.3E-7	循晋抠币	版 44日問循環 0.	0_4MPo
09-V250-M02#1®	9.0E-8	1.5E-6	9.0E-8	2.0E-7	1.5E-6	阳极环风	TTHINI保	o. 4mi a
13-350-C05 #1①	6.7E-7	1.5E-7	4.2E-8	3.2E-6	1.5E-7	循環採取	£理烦伤 15日明海理	1 GMPo
13-350-C05 #12	3.9E-7	7.7E-8	3.9E-8	2.0E-6	7.7E-8		10日间相块	1. OMF a

表 7.4.1-1 希ガスの分析結果



図 7.4.1-6 圧力制御式での採取状況



図 7.4.1-7 循環式での採取状況

7.4.2 速い流れの指標となる物質

核種の漏出などを想定すると、いわゆる地下水が有意に流れる水みちを通した漏出が評価において 重要になると考えられる。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。この ような水みちの評価では、従来のような半減期の長い核種だけでなく、比較的早い地下水流動を評価 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、³H、¹⁴C などがあげられる。ここで は、このような流れが速い地下水の指標となる物質について検討する。

7.4.2.1 ³Hの濃度計測の高精度化

³Hは、半減期が12.3年で若い地下水の指標として良く用いられる。³Hが検出されればその水は50年よりも若い水であることがわかる。環境中の³H 濃度は核実験が行われた1960年代は非常に高かったが、徐々に低下してきている。近年では降水中の³H 濃度は5TU 程度である。³H の検出限界は0.3TU 程度であり、分析精度は0.1TU である。このため、新しい水の混合が5%の場合には評価ができないことになる。³H の測定精度向上を図るには、濃縮率の増加、He-ingrowthの方法がある。ここでは、濃縮率の増加について検討した。

また、トリチウムは通常液体シンチレーションカウンタ(LSC)によって測定される。この測定法は、 その前処理として電解濃縮をしたうえLSC用のカクテル剤と混合し、トリチウムの崩壊で生じたベー タ線とカクテル剤との相互作用で生じる光をカウントするものである。このため、サンプルの光特性 が変化した場合カウントに影響を与える可能性がある。トレーサー試験等の実施や掘削時に掘削液混 合の指標として、蛍光染料を用いることが多い。蛍光染料はある波長の励起光を吸収し強い蛍光を発 するため、トリチウムのサンプルに混入した場合、トリチウムのカウントに大きな影響を与える可能 性がある。通常トリチウム分析の前処理では蒸留が行われるため、この過程で多くの蛍光染料は除去 できると考えられる。しかし、蒸留の前に簡単に蛍光染料を除去することができれば、蒸留に用いる 装置やラボをトリチウムの測定に影響する可能性がある蛍光染料で汚染することなく、前処理を実施 することができるため、安定的なトリチウム分析に繋がると考えた。本検討では実際に蛍光染料がト リチウムのカウントに与える影響を明らかにし、簡易に蛍光染料を除去することができる方法につい て検討した。

(1) 試験の考え方および試験方法

先述のように、トリチウム濃度の検出下限をより低くすることができれば、坑道掘削時の地表水 の流入等をより正確に・定量的に議論することが可能となる。ここでは、トリチウム測定の前処理 法として実施している電解濃縮に着目し、電解濃縮における濃縮率とトリチウムカウントの関係を 明らかにすることを目的とした。濃縮率とトリチウムカウントの関係は計算によりある程度予想す ることが可能であるが、実際の操作で得られた試料と計算値を比較することが必要である。今回の 実験および計算から濃縮率とトリチウムカウントの関係が分かれば、目標とするトリチウム濃度に 対する濃縮率が明らかになり、この濃縮率がある程度容易に達成できるような試験系を将来構築し ていくための重要な情報となる。

トリチウム濃度測定のための電解濃縮および測定では、350mLの蒸留済みサンプルを14mL 程度に なるまで電解濃縮し、これを LSC 分析に供する。本試験では、14mL 程度になった濃縮液にさらに 350mL になるまで蒸留済みサンプルを加え、濃縮するプロセスを繰り返し、濃縮率を上げる試験を 実施することとした(多段濃縮の概念図を図 7.4.2-1 に示す)。電解濃縮におけるトリチウムの回 収率は0.88~0.90 程度であり、回収率を0.89 として計算すると、濃縮回数と定量下限は計算上表 7.4.2-1 のような関係になる。今年度は0.1TU を測定できるような濃縮手順を確立することを目標 とし、最大5回の濃縮を実施することにした。



図 7.4.2-1 トリチウム測定用試料の多段階濃縮のフロー

	濃縮段階					
	1段	2段	3段	4段	5段	6段
体積濃縮比	24.5	42.8	57.2	68.4	77.3	84.2
検出下限(1000分測定時)	0.30	0.17	0.13	0.11	0. 10	0.09
検出下限(2000分測定時)	0.21	0.12	0.09	0.08	0.07	0.06

表 7.4.2-1 多段階濃縮における濃縮率とトリチウム検出下限の関係

*検出下限値の単位はTUである

(2) 試験手順

試験手順を以下に示す。

a. サンプル

測定に供するサンプルとしては、トリチウムをわずかに含み濃縮率とトリチウムカウントの関係が明確にできるものであることが望ましい。先述のように採水地点 13MI-37 では、0.5TU のトリチウムが検出されており、今回の目的に合致する試料であると考えた。13MI-37 からは 10L タンクに採水チューブを入れ、水が容器口元まで達した時点でオーバーフローさせずにそのまま取得した。

b. 蒸留

サンプル溶液に過酸化ナトリウム・過マンガン酸カリウム・沸石を加えたあと、蒸留を実施した。蒸留はサンプルが乾固するあるいは乾固する直前まで実施し、1回の蒸留につき約 500mL を 実施した。得られた蒸留水は電気伝導度を確認し、10 μ S/cm 以下程度であることを確認の上、次の操作を行った。

c. 電解濃縮(多段階濃縮)

先述のように、ここでは最大 5 段階の濃縮を実施した。1 段階目として 350mL の蒸留後サンプ ルが約 14mL になるまで電解濃縮を実施した。2 段階目の濃縮では、この 14mL に 336mL の蒸留後 サンプルを加えて 350mL とした後、さらに蒸留したものを電解濃縮した。それ以降は上記の操作 を必要回数繰り返した。2・3・5 段階濃縮液の 3 種をトリチウム測定用サンプルとして確保した。

d. 測定

上記の溶液とシンチレーションカクテル剤を混合し、LSC でトリチウムのカウントを測定した。 測定時間は通常1段階濃縮で0.3TU のトリチウムが検出できる1000分とした。

(3) 蛍光染料がトリチウム分析に与える影響

トリチウム分析に与える蛍光染料の影響を調べるため、以下のような試験を実施した。ここで は、実際に測定する試料に蛍光染料が混入した場合の影響を明らかにするため、あえて蒸留や電 解濃縮等の処理は実施せず、カクテル剤と試料を直接混合して分析した。直接測定における感度

- 7-94 -

を確保するため、この測定では 100mL のテフロンバイアルを測定用の容器とし、50mL のサンプル と 50mL のカクテル剤を混合して容器に入れ、分析を行った。また、サンプルとしては比較的ト リチウム濃度が高いものを使用した。上記の測定における検出下限は 0.2Bq/L=約 2TU 程度であ る。作業手順を以下に示す。

a. サンプルにおけるトリチウム濃度の確認

まず比較的トリチウム濃度が高いと考えられる水サンプルを確保し、このトリチウム濃度を分析した。ここでは、通常のトリチウム濃度測定と同様に、蒸留・電解濃縮した上で分析を実施した。電解濃縮を実施した場合の検出下限は 0.03Bq/L=約 0.3TU である。測定したサンプルにおけるトリチウム濃度は 0.78Bq/L であった。

b. 蛍光染料入り試料の調製

蛍光染料がトリチウム分析に与える影響を確認するため、上記トリチウム濃度を確認したサンプ ルに対して、濃度 10mg/L になるように、ウラニン・エオシン・ナフチオン酸ナトリウム・アミノ G の4種類の蛍光染料を添加した溶液を準備した。さらに、トリチウム濃度測定への影響が見られた、 エオシン・ナフチオン酸ナトリウム・アミノ G 酸については 0.01~1.0 mg/L の蛍光染料濃度をも つ試料を調製した。

c. 分析

先述のように 50mL の蛍光染料入りサンプルと 50mL の LSC 用カクテル剤を混合して 100mL のテフ ロンバイアルに入れ、LSC 測定を実施した。

(4) 蛍光染料の影響を除去する方法

トリチウム分析に供するサンプルから蛍光染料の影響を除去する方法については、2 つの手法を 適用した。1 番目の方法は溶液から蛍光染料そのものを除去する方法であり、合成吸着樹脂やイオ ン交換樹脂を用いてサンプル中から蛍光染料を取り除く。2 番目の方法は LSC でのトリチウム分析 に影響を与えている可能性が高い、蛍光染料の光特性を失わせる方法である。第2章でも検討した ように、蛍光染料は光の照射によりその強度が低下する性質がある。これを利用して蛍光染料が発 光しないようにすれば、トリチウム分析への影響は抑えられると考えられる。

a. 溶液から蛍光染料そのものを除去する方法(ウラニン,エオシン)

ウラニンやエオシンは低い pH でフェノール基から水素を乖離することが難しくなるため、低 い pH 領域では疎水的な物質に吸着する可能性が高いと考えられる(中田ら, 2011)。このため、 これら 2 種類の蛍光染料については、pH を 4.0 として合成吸着樹脂に吸着する方法を検討した。 以下のような試験の実施を通じて、合成吸着樹脂にウラニンやエオシンを吸着除去させてトリチ ウム測定前処理法とする手順の確立を検討した。

(a) 最適な樹脂の選定

HP2MG、PAP9210、SP207、HP20、DAX-8 という5 種類の合成吸着樹脂を用いて、バッチ式にウラニ ンやエオシンを吸着させる試験を実施した。吸着試験時の樹脂と溶液の比率は 0.1g/10mL であり、 pH は硝酸で 2~4 に調整した。

(b) 条件の最適化

固液比等を変えて試験を実施し、10mg/Lのウラニンあるいはエオシンを含む 1Lのサンプルから 蛍光染料を除去できる条件について詳細を検討した。

(c) 実サンプルへの適用とトリチウム濃度測定

上記トリチウム濃度を予め確認した水試料にウラニンあるいはエオシンを入れて上記の除去法 を適用し、トリチウム濃度を測定した。もともとの試料におけるトリチウム濃度と、蛍光染料をい れさらに蛍光染料除去処理を実施した場合のトリチウム濃度を分析した。

b. 溶液から蛍光染料そのものを除去する方法(ナフチオン酸ナトリウム,アミノG酸)

ナフチオン酸ナトリウムやアミノ G 酸は低い pH でも水素イオンを乖離できるスルホ基が存在す るため、低い pH 領域でも負に帯電して溶液中に存在すると考えられることから、これらの蛍光染 料は合成吸着樹脂に吸着させて回収することは困難であると考えた。このため、これらの蛍光染料 は陰イオン交換樹脂に吸着させて除去する方法を採用した。陰イオン交換樹脂を用いてこれらの蛍 光染料を除去し、トリチウムを分析するための手順を確立するため、以下のような検討を実施した。

(a) 最適な条件の検討

陰イオン交換樹脂として Dowex1×8 を用い、1000mg/L の NaCl をベースの溶液として 10mg/L の蛍 光染料を含む溶液と樹脂を接触させ、樹脂と接触後のナフチオン酸ナトリウムやアミノ G 酸濃度の 変化を明らかにした。固液比や接触時間を変えて試験を実施し、処理に最適な固液比や時間を決定 した。

(b) 実サンプルへの適用とトリチウム濃度測定

上記トリチウム濃度を予め確認した水試料にナフチオン酸ナトリウムあるいはアミノG酸を入れ て上記の除去法を適用し、トリチウム濃度を測定した。もともとの試料におけるトリチウム濃度と、 蛍光染料をいれ、さらに蛍光染料除去処理を実施した場合のトリチウム濃度を分析した。

c. 蛍光染料の光特性を失わせる方法

蛍光染料の蛍光強度を低下させる試みについては、日光への曝露によって蛍光染料の蛍光強度が 低下することを利用し、蛍光染料の蛍光を発する性質を抑えてトリチウム濃度を分析する方法を以 下の手順で検討した。

(a) 日光曝露による効果の確認

ウラニン・エオシン・ナフチオン酸ナトリウム・アミノG酸の4種類の蛍光染料をそれぞれ10mg/L

含む溶液を日光に曝露し、経過時間とそれぞれの蛍光強度の関係を明らかにする試験を実施した。 これにより、必要な日光曝露時間を決定した。

(b) 日光曝露前後のトリチウム濃度の分析

あらかじめトリチウム濃度を測定した試料に、上記4種類の蛍光染料を加えさらに日光への曝露 を行った試料について、トリチウム濃度を測定し、日光への曝露によって蛍光染料がトリチウム分 析に与える影響が低減されているかを確認した。

(5) 試験結果および考察

a. 蛍光染料濃度とトリチウム分析に与える影響

蛍光染料を 10mg/L 含む溶液について、直接トリチウム濃度を測定した結果を表 7.4.2-2 に示 した。表においてトリチウム濃度はBq/mL で記述している。また、表中の ESCR は External Standard Channel Ratio のことであり、溶液中で発光をクエンチングする現象の有無を判断するために用 いる値である。用いた分析装置では 9.5~13.0 が測定可能範囲とされており、これより値が低い 場合には溶液自身による発光の吸収(クエンチング)が生じている可能性が疑われる。表から分 かるように、ウラニンは濃度~10mg/L の範囲では、トリチウム濃度測定に対してほとんど影響を 与えない。一方ナフチオン酸ナトリウムやアミノ G 酸はトリチウム濃度が大きく増加しており、 これらの蛍光染料の混入が見かけのトリチウム濃度を増大させてしまう可能性を示している。 さ らに、エオシンについては ESCR が 7.65 と低下しており、蛍光染料が存在することによるクエン チングが起きていることがわかる。トリチウム濃度測定に影響のあった 3 種の蛍光染料について は、さらに蛍光染料濃度とトリチウムの見かけ上の濃度の関係を調べた。結果を図 7.4.2-2~4 にまとめた。

含まれる蛍光染料	トリチウム濃度(Bq/L)	ESCR
ウラニン	0.67 ± 0.08	10.56
エオシン	0.60 ± 0.10	7.65
ナフチオン酸ナトリウム	8.89 ± 0.12	11.72
アミノG酸	23.59 ± 0.19	11.35
蛍光染料を含まない (直接測定)	0.76 ± 0.08	11.84
蛍光染料を含まない (電解濃縮)	0.78 ± 0.08	10.99

表 7.4.2-2 蛍光染料の種類とトリチウムの見かけ上濃度の関係



図 7.4.2-2 エオシン濃度と見かけ上トリチウム濃度の関係 ※ 図中の点線は蛍光染料添加前の試料におけるトリチウム濃度を示している



図 7.4.2-3 ナフチオン濃度と見かけ上トリチウム濃度の関係 ※ 図中の点線は蛍光染料添加前の試料におけるトリチウム濃度を示している

- 7-98 -



図 7.4.2-4 アミノG 酸濃度と見かけ上トリチウム濃度の関係 ※ 図中の点線は蛍光染料添加前の試料におけるトリチウム濃度を示している

図からわかるように、エオシン・ナフチオン酸ナトリウム・アミノGについては蛍光染料濃度が 1mg/L でほぼ蛍光染料の影響は消え、0.1mg/L 以下ではほとんど同じ値を示すことがわかった。器 具や実験室へのコンタミを防ぐという意味では、蛍光染料の濃度は低いほど良いと考えられるが、 分析結果を基にして、今回の試験における蛍光染料除去濃度の目標値を0.1mg/Lとした。

b. エオシンの除去方法検討

先述のようにウラニンはトリチウム分析において影響が少ないため、除去対象から除外しエオシンについて合成吸着樹脂による除去を試みた。表 7.4.2-3 には先述の 5 種類の樹脂を用いて、0.1g/10mLの固液比、10mg/Lの濃度で含まれるエオシンをどの程度除去できるかを検討した結果を示す。表における除去率は、以下の式で定義している。

除去率(%) =
$$\frac{[C]_{b} - [C]_{a}}{[C]_{b}} \times 100$$

ここで[C]b:樹脂と接触前のエオシン濃度、[C]a:樹脂と接触後のエオシン濃度である。
家法のいり	サンプル番号		樹脂と接触	触後エオシン	農度(μg/L)	
AB / X O/PH	樹脂の種類	PAP9210	HP2MG	HP20	SP207	DAX-8
	1	UD	UD	UD	UD	UD
2	2	UD	UD	UD	UD	UD
2	平均值	UD	UD	UD	UD	UD
	除去率	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	1	UD	3.51	1.95	UD	0.24
2	2	UD	2.81	1.66	UD	0.69
	平均值	UD	3.2	1.8	UD	0.5
	除去率	100.00	99.97	99.98	100.00	100.00
	1	2.20	216	183	0.16	94.0
4	2	2.15	214	190	0.00	93.8
4	平均值	2.2	215.0	186.9	0.1	93.9
	除去率	100.00	97.85	98.13	100.00	99.06

表 7.4.2-3 樹脂の種類と樹脂と接触後のエオシン濃度の関係

表から分かるように、樹脂: SP207を用いると、今回試験を実施した全てのpH領域において除去率は100%となり、樹脂と接触後の溶液からほとんどエオシンを検出することはできなかった。SP207は特に疎水性を強化した樹脂であり、pHが下がってイオンを乖離できなくなったエオシンを有効に吸着できたものと考えられる。この試験結果から、エオシンを除去してトリチウム濃度を分析するための試験にはSP207樹脂を用いることとした。また、エオシンのSP207への吸着は迅速に終了し、24時間の接触で十分にエオシンが除去されることを確認した。このため、樹脂と溶液の接触時間は24時間とした。

次のステップでは、実際にトリチウム濃度を分析することを想定し、濃度 10mg/L・容量 1L のエ オシン溶液に対して 10g の SP207 樹脂を添加してエオシンを除去する試験を実施した。接触はガラ ス製ビーカーで行い、1L のエオシン溶液に 10g の樹脂を加えた後スターラーで緩やかに撹拌し、24 時間樹脂と溶液を接触させた。その結果、エオシン濃度は 0.14µg/L=0.000014mg/L まで低下し、十 分に目標濃度である 0.1mg/L 以下を達成できることがわかった。

今後、トリチウム濃度が既知の水試料にエオシンを加え、上記の手順でエオシンを除去した試料 のトリチウム濃度を分析することにより、樹脂接触前のトリチウム濃度とエオシン添加→除去処理 後の試料のトリチウム濃度を比較することで、この手法の有用性を確認していく。

c. ナフチオン酸ナトリウムおよびアミノG酸の除去方法検討

ナフチオン酸ナトリウムおよびアミノG酸については、1000mg/LのNaCl溶液にそれぞれ10mg/L になるように蛍光染料を添加した溶液を試験液として、樹脂と溶液を接触させる試験を実施し、固 液比や経過時間に対する上澄み溶液中蛍光染料濃度の依存性を明らかにした。樹脂には一般的な強 塩基性陰イオン交換樹脂であるDowex1×8を用いた。

図7.4.2-5にはアミノG酸について樹脂と溶液の固液比を変えた場合の上澄み溶液中アミノG酸

濃度の経時変化を示した。バックグランドの溶液が 1000mg/Lの NaCl であれば、0.5g/100mL 以上の 固液比で目標値である 0.1mg/L 以下が十分に達成可能であることが確認できた。以降の試験では、 さらに吸着容量に余裕を持たせて 1.0g/100mL の固液比で検討を実施した。さらに、実際のトリチ ウム分析を想定 1L の規模で試験を実施した。Dowex1×8 樹脂 10g を、10mg/L のアミノ G 酸を含む 1L の溶液に入れ、24 時間スターラーで緩やかに撹拌した。24 時間後上澄み溶液中のアミノ G 酸濃 度を測定した結果 10mg/L あったアミノ G 酸の濃度は 0.20µg/L=0.000020mg/L にまで低下しており、 実規模でも十分にアミノ G 酸を除去することができることを確認した。

図7.4.2-6にはナフチオン酸ナトリウムについて樹脂と溶液の固液比を変えた場合の上澄み溶液 中ナフチオンサンナトリウムの濃度の経時変化を示した。アミノG酸よりもナフチオンサンはやや 陰イオン交換樹脂のサイトと交換されにくいが、バックグランドの溶液が1000mg/LのNaClであれ ば、アミノG酸と同様に0.5g/100mL以上の固液比で目標値である0.1mg/L以下が十分に達成可能 であることが確認できた。以降の試験では、さらに吸着容量に余裕を持たせて5.0g/100mLの固液 比で検討を実施した。さらに、実際のトリチウム分析を想定1Lの規模で試験を実施した。Dowex1 ×8樹脂50gを、10mg/Lのナフチオン酸ナトリウムを含む1Lの溶液に入れ、24時間スターラーで 緩やかに撹拌した。24時間後上澄み溶液中のアミノG酸濃度を測定した結果10mg/Lあったナフチ オン酸ナトリウムの濃度は3.3µg/L=0.00033mg/Lにまで低下しており、実規模でも十分にナフチオ ン酸ナトリウムを除去することができることを確認した。

以上のように、アミノG酸・ナフチオンサンナトリウムが存在する溶液については、陰イオン交換樹脂を使って十分に蛍光染料濃度を除去できる条件を示すことができた。本手法においてはトリ チウム測定に影響を与える蛍光染料は液相から除去されるため、(後述の日光曝露では除去される のではなく、蛍光を発しない形に変質する)除去処理後のサンプルはトリチウム測定について影響 が完全に無くなっていると考えて良い。



図 7.4.2-5 陰イオン交換樹脂と接触後の溶液中アミノG酸濃度の経時変化 ※ 図中の点線は蛍光染料除去の目標値に設定した 0.1mg/Lを示している



図 7.4.2-6 陰イオン交換樹脂と接触後の溶液中ナフチオン酸ナトリウム濃度の経時変化 ※ 図中の点線は蛍光染料除去の目標値に設定した 0.1mg/L を示している

d. 日光への曝露による蛍光特性の変化

エオシン・ナフチフチオン酸ナトリウム・アミノ G 酸を 4.0mg/L 含む溶液をガラス容器に入れ、 7 日間日光に曝露する試験を実施した。試験時間と各蛍光染料の蛍光強度の関係を図 7.4.2-7 に示 した。図では初期濃度を 100%として濃度を示している。図から分かるように日光への曝露によって、 蛍光染料の蛍光強度を大きく減らすことができる。10mg/L に相当する蛍光強度を 0.1mg/L に相当す るところまで低下させるには、蛍光染料の濃度を 1%以下にする必要がある。7 日間の日光への曝露 により、3 種類の蛍光染料に対してこの条件を達成することが可能であることを確認することがで きた。

一方、溶液中の TOC 濃度を分析したところ、7 日間の日光への曝露後の試料においてエオシンで は曝露前の 85%、アミノ G 酸では 87%、ナフチオン酸ナトリウムでは 90%の TOC 濃度であることがわ かった。このため、この方法では蛍光染料の蛍光特性は失われているものの、有機物そのものが溶 液から除去されているわけではない。蛍光染料が日光によって変質した有機物がトリチウムの分析 に影響を与えるかについては、実際に日光に曝露前後のサンプルについてトリチウム濃度を分析し てみる必要がある。蛍光染料を加える以前のサンプル、および蛍光染料を加えた後に日光曝露して 蛍光染料の強度が減少した後のサンプルについて、トリチウム濃度測定を実施した。



図 7.4.2-7 日光に曝露した溶液中の蛍光染料濃度の経時変化 図中の点線は蛍光染料除去の目標値に設定した10mg/Lに対して 0.1mg/Lを達成するための濃度を示す

トリチウム分析の結果、蛍光染料添加前の湧水で 0.41±0.11Bq/L だったのに対して、ウラニン蛍 光曝露後で 0.63±0.13Bq/L、エオシン曝露後で 0.63±0.11Bq/L、NAP除去処理後で 0.48±0.11Bq/L、 AG 除去処理後で 0.66±0.11Bq/L となり、ほぼ同程度の値を示した。このことから、日光への曝露 で蛍光染料の蛍光強度が減じた結果、トリチウム分析への影響をほぼ取り除くことができることが わかった。

(6) まとめ

トリチウム濃度を正確に定量するために、①トリチウム濃度の正確な定量の妨害要因となりうる 蛍光染料の除去方法の検討、②トリチウム分析を目的とした多段電解濃縮の検討、について実施し た。トリチウム妨害要因となる蛍光染料については、日光への曝露による光分解やイオン交換樹 脂・合成吸着樹脂を利用した方法で除去することが可能であり、トリチウム測定への影響を除去す ることができる。多段濃縮についてはトリチウム分析値の比較から、低いトリチウム濃度であって も正確に定量可能な分析の前処理方法の手順をとりまとめていく。

7.4.2.2¹⁴C (無機)の測定の高精度化検討

(1) 検討の背景および目的

¹⁴C は、半減期が 5730 年であるため、3 万年以下程度の地下水滞留時間評価に頻繁に使われる同 位体である。処分場を建設する際などには地下空間に対して周辺の地下水が流入することが考えら れるが、その際地下での滞留時間がほとんどない地表水の混合は先述のように³H や CFCs・SF6 など が有用な指標となる可能性が高い。処分場近辺の地下水年代が 3 万年を超えており、有意な¹⁴C が 検出されないようであれば、処分場周辺に若い地下水が流入していることの有用な指標になる。¹⁴C を用いれば地表水よりも地下での経過時間が長くかつ 3 万年より若い地下水の流入についての情報 を得ることができると考えられる。

通常地下水から無機炭素を回収するには、下記のような手順で炭酸ストロンチウムの沈殿生成し、 生じた沈殿を回収する方法が用いられる。①水酸化ナトリウムやアンモニアを用いて対象とする地 下水をアルカリ化する、②アルカリ化した地下水に高濃度の塩化ストロンチウム溶液を添加する、 ③溶液を1晩程度静置し、炭酸ストロンチウム微粒子を沈殿させる。この手順で生成した炭酸スト ロンチウム沈殿を抽出装置内でリン酸を用いて溶解させ、鉄などを用いて二酸化炭素を還元し、AMS のターゲットとなる黒鉛を精製する。しかし、今まで実施してきた地下水調査において、上記の手 法では沈殿が生じないケースが見られた。これは、①無機 C 濃度が低く炭酸ストロンチウムの沈殿 が上手く生成しない、②無機 C 濃度は十分あるものの沈殿が生じない、という 2 つのケースがある。 ②は主に海水を起源とした地下水において観察されることが多く、海水に含まれる成分が炭酸スト ロンチウムの沈殿生成を妨害している可能性があると考えられる。このように沈殿が生じにくい地 域の地下水から得られた¹⁴C年代の値について検討したところ、¹⁴Cの分析値のばらつきが大きくか つ、He などその他の年代指標が示す年代より若い値を示す傾向にあることが分かった。

沈殿を用いない二酸化炭素の回収方法として、二酸化炭素のガス化追い出し方法が挙げられる。 二酸化炭素は pH を 4.0 以下とするとほとんどが気体となり、液中には存在しにくくなる。 pH を下 げる、溶液と接触する気体部分の圧力を減じるなどして、二酸化炭素をガスとして取り出し、回収 する方法である。この方法を用いれば、沈殿ができにくい試料においても二酸化炭素を効率よく回 収することができると期待される。しかし、沈殿法とガス化法が同じサンプルに対して適用されそ の値を比較した例はほとんどなく、どちらの方法がどの程度精度よく¹⁴C を分析できるのか、どの ような試料に対してはどちらの方法を適用すべきかについてはさらに情報が必要である。

過去の調査において、地下水サンプルにおける¹⁴Cの値をガス追い出し法と炭酸ストロンチウム 沈殿法で比較した(表 7.4.2-4)。このとき、¹⁴C年代はガス追い出し法の方が古い値を示し、ガス追 い出し法で得られた値の方が他の年代指標との整合性は良かったが、実地下水サンプルでは「真の 無機¹⁴Cの値」を知ることが難しいため、どちらの方法がどの程度正確なのかを定量的に議論する ことは困難であった。

きわれてな	¹⁴ C 測定值							
武科名	¹⁴ C 年代	$d^{14}C$ (‰)		pMc (G	‰			
沈殿法-1	15390 ± 60	-852.8 ±	1.1	0.147 \pm	0.001	-16.4		
沈殿法-2	12730 ± 50	$-795.0 \pm$	1.3	0.205 \pm	0.001	-17.9		
沈殿法-3	13970 ± 60	-824.3 ±	1.3	$0.176 \pm$	0.001	-18.0		
沈殿法平均	平均值:14000	σ:1331				-17.4		
バブリング法-1	17510 ± 70	-886.9 ±	1.0	$0.113 \pm$	0.001	-17.6		
バブリング法-2	19450 ± 80	-911.2 ±	0.9	$0.089 \pm$	0.001	-16.6		
バブリング法-3	17300 ± 70	-883.9 ±	1.0	0.116 ±	0.001	-17.3		
バブリング法平均	平均值:18000	σ:1185				-17.2		

表7.4.2-4 地下水サンプルにおける沈殿法と追い出し法で取得した¹⁴Cの比較結果

そこで、今年度は¹⁴C が既知の試料において、ガス追い出し法と沈殿法を比較し、無機 C 濃度や 共存するイオン濃度が最終的な¹⁴C の値に与える影響を評価することを目的として、以下の項目に ついて検討を実施した。

- ・ ガス追い出し法におけるガストラップの検討
- ・ 炭酸水素ナトリウム試薬におけるガス追い出し法と沈殿法の比較
- ・ その他の条件を変えた場合の比較

(2) ガス追い出し法におけるガストラップの検討

a. 目的と検討事項

ガス追い出し法における試験系の概念図を図 7.4.2-8 に示した。図に示したように、サンプルか ら追い出された二酸化炭素ガスは、水蒸気を除去した上液体窒素で冷却した「二酸化炭素トラップ」 に捕捉される。二酸化炭素トラップが発送できるほど簡易・安価なものであり、輸送中二酸化炭素 を封じ込めておけるのであれば、回収試験終了後の二酸化炭素トラップをそのまま測定機関へと送 付することが可能である。現在の二酸化炭素トラップは二酸化炭素を確実にトラップするため、細 かく刻んだ銅管を封入した SUS の U 字管であり、高価な上にそれなりの重量があり、量産してサン プルを送付するのには適していない。分析機関でのガスの取り扱いを考えるとトラップ内に充填し た充填物は、処理にかかる時間を長くするため、二酸化炭素が確実に捕捉できるのであれば、充填 物は少ないあるいは無い方が望ましいことになる。しかし、充填物を減らしたときに、図に示した 試験系において発生した二酸化炭素が確実に捕捉できるかを確認する必要がある。

そこで、今年度の試験ではまず種々の二酸化炭素トラップを試作し、トラップの二酸化炭素捕捉 効率を確認した。捕集効率を比較した結果から、二酸化炭素の捕集かつ封入したガスサンプルの送 付に適したトラップを選定した。比較対象としたトラップは①銅管をU字型に曲げスチールウール を充填したトラップ、②SUS 管をU字型に曲げスチールウールを充填したトラップ、③SUS 管をU 字型に曲げ充填物がないトラップ、である。



図 7.4.2-8 二酸化炭素回収試験装置の概念図(左)と実際の写真(右)

b. 試験方法

試験は以下の手順で実施した。

(a) トラップの準備

外径 1cm の銅管または 1/4 インチの SUS 管の内部にスチールウールを充填した上で U字型に曲げ、 液体窒素用のデュアービン(内径 66mm、液体窒素充填可能な部分の高さ 120mm)に入る大きさにし た。また、SUS 管の一部についてはスチールウールを充填せずに U 字型に整形したものも準備した。 両端には He 等でリークレートが保証されており、リークレートが 1 ヶ月程度の保管・輸送に耐え られる程度小さいことが確認できたバルブを取り付けた。これらの U 字管を新たな二酸化炭素トラ ップとして用いた。

(b) 試験系の組み立て

図 7.4.2-8 に示した試験系を組み、二酸化炭素トラップを上記で作製したものにした。さらに、 0.5mo1/L NaOH 溶液 200mL を入れ、溶液を通じてガスが流れるようにした「アルカリトラップ」を 2 つ準備した。

(c) 試験系の He 置換

試験容器の方から He ガスを流し、容器内の気体を He で置換した。同時にアルカリトラップは He ガスでバブリングした。He を流速 500mL/min で 30 分間フローした後、容器や接続箇所のバルブを 全て閉鎖した。水トラップはクーラーを用いて-10℃に、二酸化炭素トラップは液体窒素に浸漬し て冷却した。

(d) サンプル溶液の導入

サンプルとして無機 C 濃度が 10mg/L となるように NaHCO₃ を溶解させた溶液を使用した。溶液 2L をポリビンにいれて重量を測定し、反応容器内部と繋がるラインをポリビンの中に入れた。ポリビ ンと反応容器間のラインは大気が入り込まないよう、シリンジ等を用いて溶液で置換した。その後 反応容器内部を真空引きし、5 分程度負圧が維持されるのを確認したあと、溶液と反応容器をつな ぐラインに設置したバルブを開けた。試験溶液が反応容器内に約 2L 負圧で引き込まれるのを確認 し、バルブを閉じた。試験溶液は導入前後の重量を測定し、反応容器内に引き込まれた溶液量を算 出した。

(e) 二酸化炭素の回収(第1段階)

圧力が大気圧程度になるまで、容器のヘッドスペースに He をいれた後、溶液にリン酸溶液(85%) 10mL を添加し、反応容器内のスターラーを回転させた。水トラップの2つのバルブ、二酸化炭素ト ラップの入口側バルブを開け、この時点でヘッドスペースにいる可能性がある二酸化炭素をトラッ プへ吸着させた(30分)。

(f) 二酸化炭素の回収(第2段階)

容器底部から He ガスを 100mL/min で流し、二酸化炭素トラップの出口側バルブを開けた。この 操作により、溶液から発生したガスを He でフローさせながら二酸化炭素でトラップした。液体窒 素の液面を保ちながら、3.5 時間 He をフローさせた。

(g) 二酸化炭素のアルカリトラップへの回収

上記の操作後、二酸化炭素トラップ前後のバルブを閉鎖し、新たに二酸化炭素トラップ-アルカ リトラップ-ポンプ-流量計を図 7.4.2-9 のように接続した。二酸化炭素トラップ前後のバルブを開 け、ポンプを稼働させて 50mL/min でガスが循環するように流量計を調整した。二酸化炭素トラッ プはドライヤーで温風をあてて 10 分間加熱した。45 分間ガスを循環させ、回収試験を終了した。 (h) アルカリトラップ内溶液の分析



TOC 計を用いてアルカリトラップ内の NaOH 溶液における IC 濃度を分析した。

図 7.4.2-9 二酸化炭素トラップからアルカリトラップへの回収時の試験系

c. 結果と考察

銅は熱伝導性が良く液体窒素等に浸漬後容易に冷却されるためこの性質自体はトラップとして 有用であると考えられた。また、銅は金属としては柔らかく、U字管を作製するのも比較的容易で ある。しかし、実際の二酸化炭素トラップはU字の下の部分を液体窒素に浸漬して、一部はデュア ーびんから大気に出して使用する。熱伝導性の良い銅パイプを用いたU字管はその先に接続したバ ルブまで液体窒素の影響を受けて温度が下がり、試験終了後バルブが閉じにくくなるという問題が 生じた。このように熱伝導度が高すぎる素材をトラップに用いる場合には、バルブとの間に熱容量 の大きな「熱アンカー」をうつ必要が生じ、結果的にトラップが大きなものにならざるを得ない。 このため、銅管を利用したトラップは今回の目的には不適であると判断した。 1/4 インチの SUS 管を使ったトラップにおいて、スチールウールを充填した場合の二酸化炭素回 収率は 91%程度であったのに対し、充填物を入れない場合でも二酸化炭素の回収率は 91%程度であ った。一般的にガスを効率よくトラップするためには、ガスの流れに障壁をつくり、ガスが冷却さ れた金属に多く衝突するような仕組みを設ける。しかし、今回試験した条件(バックグランドガス: He、バックグランドガスの流量:100mL/min、トラップするターゲットガス:二酸化炭素)におい ては、充填物がなくても二酸化炭素をほぼ全量トラップに捕集できることがわかった。

以上の検討の結果から、以降の試験においては二酸化炭素トラップとして 1/4 インチの U 字管を 採用した。

(3) ガス追い出し法と沈殿法の比較(炭酸水素ナトリウム溶液)

a. 目的と検討事項

ガス追い出し法と沈殿法における¹⁴Cの差を明らかにするため、まずは炭酸水素ナトリウム溶液 を用いて比較試験を実施した。後述のように市販の炭酸水素ナトリウムにはほとんど¹⁴Cが含まれ ず、pMCは0.5%程度の値をとる。このため、より「古い」¹⁴C年代を評価できた方法がより溶液中の ¹⁴Cを評価するために適した方法であると考えることができる。今回はガス追い出し法による¹⁴Cの 評価値をクロスチェックするため、以下に示す違った条件での試験結果を比較した。

- ・ 電中研で調製した炭酸水素ナトリウム溶液を測定機関に直接送付しガス追い出し法で得ら れた C から¹⁴C を評価した結果
- ・ 電中研で調製した炭酸水素ナトリウム溶液を測定機関に直接送付し炭酸ストロンチウム沈
 殿法を実施して得られた沈殿から¹⁴Cを評価した結果
- ・ 電中研で調製した炭酸水素ナトリウム溶液を電中研内でガス化させガスサンプルを測定機
 関に送付した結果
- b. 試験方法

試験は以下の手順で実施した。

(b) 雰囲気制御グローブボックス(GB)の準備

大気中の二酸化炭素の影響を極力排除するため、試験溶液の調製は Ar で雰囲気制御した GB 内で 実施した。GB は循環ポンプを備えており、モレキュラーシーブによる吸着と銅触媒による反応で水 や酸素を除去することができる。本試験ではさらに GB 内に大量の二酸化炭素吸収剤を入れ、二酸 化炭素も除去した雰囲気下での試験を実施した。

(c) 溶液の準備

試験溶液には炭酸水素ナトリウム溶液を使用した。炭酸水素ナトリウムは和光純薬から購入した 試薬特級を用いた。まず試薬ビンから直接ガラスビンに固体を一部取り分け、「固体分析用サンプ ル」とした。さらに、0.29gを秤量して、上記の GB 内へと搬入した。また、サンプル輸送用の容器 としてガスが透過しにくい「フロロバリアボトル」を選定し、これも必要個数を GB 内に搬入した。 ガスが循環し、十分に二酸化炭素が除去されたところで、溶液の調製作業を開始した。試験溶液の 調製に用いる純水は 2L の容器に満水状態にしたものを GB 内に持ち込み、GB 内で 24 時間程度二酸 化炭素を除去済みの(GB 内の) Ar ガスをバブリングし、溶解している二酸化炭素を極力排除する ようにした。5L のビーカーに 4L のバブリング後純水を入れてスターラーを回転させ、0.29g 秤量 した炭酸水素ナトリウムの粉末を入れた。元々純水に溶解している二酸化炭素量を評価するため、 純水の一部は IC 測定用に取り分けた。スターラーを回して炭酸水素ナトリウムを溶解させた後、 フロロバリアボトルにヘッドスペースができないように炭酸水素ナトリウム溶液をいれ、GB 内で厳 重にフタをした。

(d) サンプルの送付

同じ条件で調製された試料を1Lのフロロバリアボトルに3本分充填し、この操作を2回実施した。これにより6本のNaHCO₃溶液を得た。うち2本は電中研内でガス化するためのサンプルとし、2本は炭酸ストロンチウム処理用として、2本はガス化処理用として測定機関へ送付した。

(e) ガス化サンプルの取得

炭酸水素ナトリウム溶液のうち、2本は電中研内でガス化して測定機関へと送付した。ガス化-回収の手順は上述の「二酸化炭素トラップ検討」に記述した通りであるが、今回の試験では、二酸 化炭素トラップ前後のバルブを閉じたものをそのまま(アルカリに再トラップすることなく)測定 機関へと送付した。

(f) 炭素同位体比の分析(測定機関にて実施)

気体のサンプルはこれを直接黒鉛生成用のラインに接続し、二酸化炭素ガスを Fe 粉末で還元し て得られた黒鉛を分析に供した。炭酸ストロンチウム沈殿用試料は、アンモニアおよび塩化ストロ ンチウム溶液を加えて沈殿を作成後、沈殿にリン酸を加えてガス化したものを上記と同様黒鉛にし て分析に供した。¹⁴C は加速器質量分析法(AMS)を使って分析した。

c. 結果と考察

炭酸水素ナトリウム溶液に対して以下の3つの処理をして¹⁴Cを測定した結果を表7.4.2-5 に示 した。表に示したように、固体の炭酸水素ナトリウムにおける¹⁴Cは0.4~0.5pMC程度である。Ar でバブリングした純水をTOC計で分析したところ、0.3mg/Lの無機Cが検出された。溶液には無機 Cが10.0mg/Lとなるように炭酸水素ナトリウムを添加しているため、溶解しているCにおける¹⁴C は以下の式によりpMCにして3.3%程度であると考えられる。

溶液中の無機 $^{14}C(\%) = \frac{10.0(mg/L) \times 0.5(pMC) + 0.3(mg/L) \times 100(pMC)}{(10.0 + 0.3)(mg/L)} = 3.3$

表 7.4.2-5 模擬サンプル (NaHCO3 溶液) における沈殿法と追い出し法で取得した ¹⁴C の比較結果

サンプル番号	サンプルの状態	14C年代(年)	pMC(%)	δ13C
1-1	国体	$45,250 \pm 910$	$0.4\% \pm 0.0\%$	- 18.6
1-2		$42,860 \pm 680$	$0.5\% \pm 0.0\%$	- 17. 1
2-1	选件	19,290 ± 70	9.0% ±0.1%	- 19.6
<u> </u> 2-2	12 14	$17,340 \pm 60$	11.4% ±0.1%	- 20.2
3-1	济/士	$31,430 \pm 180$	$2.0\% \pm 0.1\%$	- 20.0
3-2	/12/14	$26,320 \pm 110$	3.7% ±0.1%	- 19.3
(4) -1	与休	$26,240 \pm 110$	3.8% ±0.1%	- 16.9
(4)-2	×1144	$26,830 \pm 118$	3.6% ±0.1%	- 17.4

サンプル①:炭酸水素ナトリウムの固体を直接測定機関に送付した試料

サンプル②:炭酸水素ナトリウム溶液を直接測定機関に送付し、炭酸ストロンチウム沈殿で回収した無機 C の¹⁴C を測定したもの

サンプル③:炭酸水素ナトリウム溶液を直接測定機関に送付し、ガス追い出し法で回収した無機 C の¹⁴Cを測定したもの

サンプル④:電中研でガス化した試料を送付したもの

表を見ると、ガス化したサンプルにおける¹⁴Cの値は電中研でガス化した場合と測定機関でガス 化した場合とでよく一致しており、ともに、2.0~3.8%程度の値を示した。これは、上記で計算し た炭酸水素ナトリウム溶液における¹⁴Cとも一致している。このため、電中研測定機関ともにガス 化して分析する手法には妥当性があり、溶液中の¹⁴Cを正しく評価できている可能性が高い。一方、 測定機関において沈殿を調製した場合には pMC が 9.0~11.4%という値を示し、上記のガス化した場 合の値と比べて顕著に大きな値を示した。2つのサンプルで値には再現性があるため、炭酸ストロ ンチウム沈殿法は地下水等の年代をやや若く評価する傾向がある可能性が疑われる。

(4) ガス追い出し法と沈殿法の比較(模擬地下水)

模擬的に調製した地下水を用いて沈殿法とガス追い出し法で得られたサンプルから¹⁴Cを評価し、 比較する試験を実施した。ここでは¹⁴C 濃度の違い、無機 C 濃度の違い、溶液中塩分濃度の違いが ¹⁴C に与える影響について評価した。

a. ¹⁴C 濃度の違い

通常試薬として販売されている炭酸ナトリウムや炭酸水素ナトリウムは炭酸ガスから合成さ れているため、¹⁴C フリーであることが多い。実際、上記の試験で得られた炭酸水素ナトリウム(固 体)の¹⁴C は 0.4 pMC(%)という低い濃度を示した。¹⁴C が高いサンプルを得るには、大気由来の二 酸化炭素を含む溶液を調製する必要がある。本試験では、以下に示す手順によって大気中の二酸 化炭素を含む溶液を調製し、ここからサンプルを得て、沈殿法とガス追い出し法を比較した。

1) 大気由来のCを含む炭酸水素ナトリウムの調製

8.0mo1/Lの水酸化ナトリウムを調製し、ここに大気を連続でバブリングした。溶液が白く濁っ

- 7-111 -

たことを確認したあと、沈殿を回収し上澄みを極力排除した。これを乾燥して粉体状の試料を得た。この粉末は炭酸水素ナトリウム・炭酸ナトリウム・水酸化ナトリウムの混合物であると考えられるが、大気由来のCから調製されたものであるため、¹⁴Cは100 pMC(%)に近いと考えられる。

2) 試験に用いる溶液の準備

上記炭酸水素ナトリウムを用いた試験の結果から、Ar ガスをバブリングした純水においても有 意な量の無機 C が残存していることがわかった。このため、本試験ではさらに真空脱気によって 溶存二酸化炭素を除去することにした。純水 1L をふた付きのガラスビン (デュランビン) に封入 した後、超音波洗浄機にかけて超音波をあてながらロータリーポンプを用いてガラスビンのヘッ ドスペースを吸引した。この操作を実施した純水を二酸化炭素濃度を低下させた Ar 雰囲気の GB に持ち込み、Ar をよくバブリングした。この操作で得られた脱気水を試験に用いた。この結果、 0.3mg/L 程度あった溶存無機 C 濃度は 0.04~0.06mg/L 程度まで低下した。

3) 溶液の準備~炭素同位体比の分析

溶液の準備から炭素同位体比の分析については、上記の炭酸水素ナトリウム溶液の試験におい て記載した通りの手順で実施した。試験には、上記で調製した炭酸水素ナトリウム等の混合物粉 末と市販の炭酸水素ナトリウム粉末を1:3 で混合したものを用いた。炭酸水素ナトリウム等の混 合物粉末は無機 C が約 10mg/L となるように調製した。

上記の操作で得られた炭酸水素ナトリウム等の混合物の粉末と市販の炭酸水素ナトリウムを混合した粉末は、pMC として 26.3 pMC(%)の値を持ち、¹⁴C 年代としては 10717 年を示した(2回測定の平均値)。この溶液を脱気水に溶解したものを沈殿法とガス化法で処理して¹⁴C を測定した結果を表 7.4.2-6 に示す。

サンプルタ	玉井	加理注		計算値との差			
922704	אריכת		(年)BF)	pMC(%)		(p MC (%))
気体サンプル 1-1	与休	(T)	_				
気体サンプル 1-2	×11×		9167 ±	32	31.9 ±	0.1	5.0
ガス追い出し法用 1-1	法休	0	$9947 \pm$	32	$29.0 \pm$	0.1	2.1
ガス追い出し法用 1-2	/12/14	E E	$10025 \pm$	32	28.7±	0.1	1.8
沈殿法用 1-1	汯休	ত্র	8842±	33	33.3±	0.1	6.4
沈殿法用 1-2	/12 1/	9	$8956 \pm$	34	32.8 ±	0.1	5.9

表 7.4.2-6 沈殿法と追い出し法で取得した ¹⁴C の比較結果(¹⁴C 濃度を高めたサンプル)

処理法①:電中研でガス化した試料を送付したもの

処理法②:炭酸水素ナトリウム溶液を直接測定機関に送付し、ガス追い出し法で回収した無機Cの ¹⁴Cを測定したもの

処理法③:炭酸水素ナトリウム溶液を直接測定機関に送付し、炭酸ストロンチウム沈殿で回収した 無機 C の¹⁴C を測定したもの 表において「計算値との差」とは、サンプル調製時に純水に残留している無機 C 濃度、炭酸水素 ナトリウム粉末を加えた後で得られた溶液中の無機 C 濃度、炭酸水素ナトリウム粉末における¹⁴C、 大気における¹⁴C (100pMC(%)とした)から計算した値である。表から分かるように、測定機関に液 体状で送付してガス化したサンプルが最も計算値と近い値を示し、ついで気体状サンプル、沈殿法 の値となった。ガス追い出し法と沈殿法を比較すると、沈殿法が若い値を示すことがここでも明ら かである。上記のように炭酸水素ナトリウムのようにほとんど¹⁴C を含まないサンプルにおいては、 わずかな¹⁴C の汚染が大きな年代のずれにつながる。炭酸水素ナトリウムの場合には、沈殿法とガ ス化法とでは年代にして1万年程度のずれが生じたのに対して、1万年程度の年代においては1000 年程度のずれに留まっている。¹⁴C が同程度の量混入した場合、古い年代の地下水ほど大きな影響を 受けることに留意する必要がある。

b. 無機 C 濃度の違い

上記「a. ¹⁴C 濃度の違い」で示した試験と同じ炭酸水素ナトリウム粉末を用いて、無機 C 濃度 が約 5mg/L となるように調製した溶液を調製し、ガス化法と沈殿法で得られる ¹⁴C を比較した。試 験方法は①に示したのと同様である。¹⁴C の測定結果を表 7.4.2-7 に示した。

サンプルタ	影华	加理法	m _{理注} ¹⁴ C測定值				計算値との差
	7247	龙生丛	(年)BP		p MC (%)		(p MC (%))
気体サンプル 2-1	与休		9294 ±	32	31.5 ±	0.1	4.3
気体サンプル 2-2			_				
ガス追い出し法用 2-1	海休	0	$9534 \pm$	37	$30.5 \pm$	0.1	3.3
ガス追い出し法用 2-2	1/12/14		9591±	37	$30.3 \pm$	0.1	3.1
沈殿法用 2-1	海休	3	$7459 \pm$	32	$39.5 \pm$	0.2	12.3
沈殿法用 2-2	1/12/14		$7502 \pm$	32	$39.3 \pm$	0.2	12.1

表 7.4.2-7 沈殿法と追い出し法で取得した¹⁴Cの比較結果(C濃度 5mg/L)

処理法①:電中研でガス化した試料を送付したもの

処理法②:炭酸水素ナトリウム溶液を直接測定機関に送付し、ガス追い出し法で回収した無機Cの ¹⁴Cを測定したもの

処理法③:炭酸水素ナトリウム溶液を直接測定機関に送付し、炭酸ストロンチウム沈殿で回収した 無機 C の ¹⁴C を測定したもの

表に示したように、溶液中の無機 C 濃度が低下すると、ガス化法と沈殿法の差がより顕著になる。 このため、低濃度の試料においては沈殿法における影響が顕著であることを留意する必要がある。 c. バックグランドのイオン濃度の違い

上記「a. ¹⁴C 濃度の違い」で示した試験と同じ炭酸水素ナトリウム粉末を用いて、模擬海水に 炭酸水素ナトリウムを溶解させて調製した溶液を用いてガス化・沈殿法で得られたサンプルの¹⁴C を比較した。試験方法は①に示したのと同様である。¹⁴C の測定結果を表 7.4.2-8 に示した。

サンプルタ	影华	_{如理注} ¹⁴ C測定值					計算値との差
	ארפת	龙生丛	(年)BP		p MC (%)		(p MC (%))
気体サンプル 3-1	気休		$9655 \pm$	30	30.1±	0.1	3.1
気体サンプル 3-2			9181±	38	31.9 ±	0.2	5.0
ガス追い出し法用 3-1	汯休	0	$9890 \pm$	38	29.2 ±	0.1	2.2
ガス追い出し法用 3-2		2	9706±	38	$29.9 \pm$	0.1	3.0
沈殿法用 3-1	汯休	3	3770 ±	22	$62.6 \pm$	0.2	35.6
沈殿法用 3-2	1/12/14		$5994 \pm$	27	47.4 ±	0.2	20.5

表 7.4.2-8 沈殿法と追い出し法で取得した¹⁴Cの比較結果(模擬海水ベース)

処理法①:電中研でガス化した試料を送付したもの

処理法②:炭酸水素ナトリウム溶液を直接測定機関に送付し、ガス追い出し法で回収した無機Cの ¹⁴Cを測定したもの

処理法③:炭酸水素ナトリウム溶液を直接測定機関に送付し、炭酸ストロンチウム沈殿で回収した 無機 C の ¹⁴C を測定したもの

表から分かるように、ベースを海水とした場合沈殿法とガス化法の差は大きくなり、沈殿法では 大きなばらつきが見られた。このため、塩濃度が高い地下水においては沈殿法で¹⁴Cを評価した場 合その影響が大きくなることが分かる。

(5) まとめ

以上の結果から、以下のような知見が得られた。

- ・ 沈殿法で調製したサンプルから得られる ¹⁴C は、ガス化法で得られる値よりも若い値を示 す傾向が確認された。
- 溶液中 C 濃度が低い・溶液中¹⁴C 濃度が低い(地下水が古い)・溶液中塩濃度が高い場合
 には、沈殿法とガス化法の値の差はより顕著になることがわかった。このため、上記のよう
 な特性を持つ地下水に対してはガス化法より前処理法を選択した方が、より正確な地下水年
 代についての情報を得られる可能性が高いと考えられる。

今回得られた知見をもとにして、今後の無機 ¹℃ 評価ではガス化する方法を採用する。

7.4.2.3 ¹⁴C(有機)の地下水混合・流入指標としての利用検討

(1) 検討の背景および目的

先述のように¹⁴Cは、比較的若い地下水が古い地下水に流入していることを示すために有効な指標の一つであると考えられる。(2)の無機Cに加えて、有機物に含まれる¹⁴Cは、地下水に溶存する 有機物 (DOC: Dissolved Organic Carbon)が岩石と相互作用を起こしにくく地下水流動とともに 移動する可能性が高いため (Wassenaar et al., 1990, 1991)、無機Cより地下水流動状況を反映 しやすい可能性がある。実際、地下水年代の評価法開発において、瑞浪地域の地下水における有機 ¹⁴C 年代と He 年代を比較して、両者は良く一致することから、有機 ¹⁴C 年代が地下水年代の指標とし て有用であることを示した(図 7.4.2-10:富岡ら,2007)。上記の性質から、1万年程度の年代を 持つ若い地下水が処分場候補岩体の地下水に流入した場合、有機 ¹⁴C が検出されることが予測され、 有機 ¹⁴C の有無によって若い地下水の流入の有無を判断することが可能であると考えられる。有機 の ¹⁴C を分析するためには、地下水中から有機物を抽出・精製する必要がある。地下水から溶存有 機物を抽出方法については、地下水年代の評価法開発においてすでに検討している。しかし、既往 の研究は主に淡水からの有機物回収方法について検討されており、海水起源の溶存イオン濃度が高 い地下水に対しての回収方法は十分に検討されているとは言えない。日本のように周囲を海に囲ま れた環境では、処分候補地で海水由来の地下水が存在する可能性が高く、海水由来の地下水からの 有機物の回収方法の検討が必要である。

通常地表水や地下水から DOC を採取するには、主に3つの方法が用いられる(長尾,2008)。つ まり、①合成吸着樹脂による疎水性吸着を用いる方法、②陰イオン交換樹脂を用いた回収方法、③ 膜を用いた濃縮法、である。海水起源の地下水は一般的にイオン濃度が高くイオン交換サイトが少 量の試料で飽和してしまうため、②の陰イオン交換樹脂を用いる方法を適用することは現実的では ない。また、イオン強度が高い環境下では合成吸着樹脂への吸着が阻害されるため、①の合成吸着 樹脂を用いる方法も適用が難しいと考えられる。このため、海水由来の地下水から有機物を濃縮す るには、膜を用いて有機物を濃縮する方法が現時点で最も現実的である(Gurtler et al.,2008)。 膜で濃縮した有機物(膜で濃縮した地下水に含まれる有機物)における有機¹⁴Cを測定するために は、サンプルを測定できる形態に精製する必要がある。通常¹⁴Cを測定するためには、加速器質量 分析(AMS)が用いられる(例えば Nagasawa et al.,2013)。AMSのターゲットはグラファイト(黒 鉛)であるため、最終的にはこの形態にサンプルを精製する必要がある。有機物を粉末の形状に精 製することができれば、有機物の粉末を加熱して二酸化炭素に変換した後、鉄粉末等で還元してグ ラファイトを得ることができる。このため、膜で濃縮した有機物を粉末の形状に精製できれば最終 的にAMS 測定用のサンプルを作製することが可能である。しかし、膜で濃縮した有機物を含む溶液 は、以下のような要因により粉末の作製や¹⁴C の正確な定量が阻害される。

今年度は昨年度に続いて膜で濃縮した地下水に溶存する有機物を精製する手法について検討し、 その結果について報告する。



図 7.4.2-10 瑞浪地域の地下水における He 年代と有機 ¹⁴C 年代の関係(富岡ら(2007)に加筆)

(2) 試験方法/結果と考察

海水から膜を使って濃縮した有機物の精製について、以下のような試みを実施した。

- ・ サイズ排除クロマトグラフィを用いた精製の試み
- 透析膜や透析方法の検討
- ・ 1L 規模のサンプルを処理するための中規模試験および処理した有機物の評価
- DAX 樹脂を使った分離試験
- a. サイズ排除クロマトグラフィを利用した精製の試み

サイズ排除クロマトグラフィでは、細孔のある基材に対してある大きさの粒子を含む溶液を流す。 小さな粒径をもつ粒子は基材の細孔にトラップされて流れが遅延されるため、粒子の大きさの分布 に従って粒子を分離することができる。一般的には有機物等の粒径を分析することに用いられるが、 ここでは有機物と無機イオンとを分離する手法として、サイズ排除クロマトグラフィを利用するこ とを試みた。一般的に有機物に対して無機イオンの大きさは小さいと考えられるため、適切なカラ ムを選定すると有機物が無機イオンよりも先に溶出する可能性がある。溶離液を純水にすることで、 有機物と共存するイオンの濃度を大きく減少させることができる可能性が考えられた。このため、 海水起源の地下水から膜で有機物を濃縮した溶液を用いて、以下のような試験を実施した。

(a) 試験方法

試験は以下の手順で実施した。

1) 装置のセットアップ

有機物と無機イオンを分離するためのカラムとして、Asahipak GS-32HQを選定し、これを液

体クロマトグラフィの装置に取り付けた。溶離液として純水を用いるため、ポンプでカラムに 蒸留水を 12 時間以上通水した。また、装置のカラム出口にはフラクションコレクタを取り付 けた。

2) サンプルの打ち込み

サンプルとして海水から膜で有機物を濃縮したものを使用した。サンプル 0.9mL を装置に打ち込むと同時に、フラクションコレクタを作動させ、2 分ごとに 20 サンプルを(試験時間 40分)取得した。

3) 分析

フラクションコレクタには予め重量を測定したガラス管を入れており、採取前後の重量を測 定して各フラクションの採取量を決定した。各フラクション 1mL のうち 0.8mL を 20mL にメス アップして TOC 濃度を分析した。また、残りの溶液を使って溶液中の電気伝導度(EC)を分析 した。

(b) 試験結果

TOC および EC の分析結果を図 7.4.2-11 に示した。EC はカラム下流液が 8mL に達した時点から 上昇し 11mL でピークとなった。一方 TOC 濃度はいくつかのピークが見られ、有機物が大きさご とに分離されている様子が観察された。TOC 濃度の最も大きなピークは EC のピークと同じ 12mL のフラクションで観察された。TOC 濃度は 8mL にもピークがあり、6~9mL のフラクションを採取 すれば無機イオンを排除し溶存有機物のみを採取することが可能である。しかし、この場合溶存 有機物のロスが大きく、精製における有機物の回収率が著しく低下することが懸念される。サイ ズ排除クロマトグラフィを利用した精製は、ある程度の大きさをもつ有機物の精製には十分に利 用できる可能性があるが、ここで対象としたサンプルに対しては適用することが難しいと考えら れた。



図 7.4.2-11 サイズ排除クロマトグラフィにおける流出液中の TOC 濃度と EC の関係

b. 膜および透析方法の検討

溶存有機物を精製した場合、最終的には共存するイオン濃度を低下させるため、透析を実施す る。昨年度は市販されている透析チューブ(分子量 100-500)を利用してサンプルを透析したと ころ、透析のプロセスにおいて TOC 換算で 90%以上の有機物が失われることが分かった。このた め、今年度は地下水から有機物を濃縮したのと同じ膜を用いて透析を実施する方法について検討 した。ここでは、透析膜に加えて透析における溶液の pH などの条件を検討した。

(a) 試験方法

試験は以下の手順で実施した。

試験系の構築

地下水の有機物採取に用いたのは、東レ社製 UTC-60 膜である。UTC-60 を選定したのは、塩化 ナトリウムの透過率が高くかつ天然の有機物の模擬物質として利用した蛍光染料であるウラニン の回収率が高かったためである。UTC-60 は大規模なサンプルを処理できるモジュール形態のもの が入手可能であるほか、平膜を入手することができる。しかし、透析に適した筒状膜を入手する ことはできない。このため、本試験では、数Lまでの処理に適した膜モジュールを作製し、これ に UTC-60 の平膜を設置して透析を実施した。作製した膜モジュールを組み込んだ試験系の写真を 図 7.4.2-12 に示した。



①:UTC-60膜を固定した膜モジュール ②:膜に圧力と流れを与えるためのポンプ ③:膜を通過しない成分が濃縮される濃縮液 ④:膜を通過した成分が排出されるろえき

図 7.4.2-12 膜モジュールを組み込んだ透析試験の試験系

2) 溶液の pH 調整:

透析に供するサンプルは後述のように二酸化炭素を加えて二価イオンを除去しているため、炭

酸濃度が高い。このサンプルを直接透析したところ、激しく発泡し透析の妨げとなることがわかった。このため、ここでは溶液のpHを5.0にしてしばらく静置し、無機二酸化炭素を溶液から除去した。この状態での試験を実施した他、pHが回収効率に与える影響を明らかにするため、pHを10.0にした溶液も準備した。

3) 透析の実施

サンプル 110mL をビーカーに入れ、ろ液の量が 20・40・60・80・90mL に達したタイミングで ろ液と濃縮液の両方をサンプリングし、濃縮液中の TOC 濃度とろ液・濃縮液中の C1 濃度を測定し た。

(b) 試験結果

濃縮液の液量と濃縮液中の TOC 濃度の関係を図 7.4.2-13 に示した。図には併せて、TOC を基準と した時の回収率を示した。この回収率とは、初期の TOC×液量から算出した有機物量を 100%とした ときに、濃縮液中に存在する有機物量を表した数値である。また、C1 濃度については試験した全て のサンプルにおいて、濃縮液中 C1 濃度=ろ液中 C1 濃度、が確認された。図に示したように、膜に よる濃縮が進行すると有機物濃度が上昇する一方で、C1 濃度については濃縮液中の濃度とろ液中の 濃度が一致していた。このため、C1 は膜を通過し、有機物の一部は膜を通過していないことが確認 できた。一方「回収率」に着目すると、濃縮液の液量が 60mL を切ると急激に回収率が低下するこ とがわかる。このため、透析は液量あるいは TOC 濃度を元の溶液のように保ったままで、実施する ほうが良いと考えられる。さらに、図 7.4.2-14 では、初期の溶液の pH を 9 と 5 にした場合の回収 率を比較した。溶存有機物は溶液中の pH によって H+を乖離・吸着するため電荷が変化し、このた めに形状が変化する可能性がある。このため、透析に対しての挙動も pH に対して依存性がある可 能性が考えられた。しかし、図から分かるように、回収率については pH によって差が観察されな かった。このため、本試験では無機炭素を除去するために pH を 5.0 とした溶液をそのまま透析に 供することにした。



図 7.4.2-13 透析試験における液量と TOC 濃度および回収率の関係

左図:透析における濃縮液中の TOC 濃度と濃縮液液量の関係、右図:透析における TOC 濃度を基準として算出した C回収率と濃縮液液量の関係



図 7.4.2-14 透析における溶液の pH と回収率の関係

以上の検討結果から透析については、透析は UTC-60 膜を使用したモジュールを使用すること、 液量を一定に保ちながら(純水を加えながら)透析を実施すること、pH は回収率に大きな影響がな いため pH を 5.0 にした溶液で透析を実施すること、とした。

c. 中規模試験および精製した有機物の評価

溶存有機物を精製し最終的に¹⁴Cの測定を実施するためには、ある程度の量の濃縮液を処理し、

- 7-120 -

粉末状のサンプルを得る必要がある。ここでは、昨年度まで 50mL 程度で実施していた試験を 1000mL までスケールアップし、精製された溶存有機物を取得する試験を実施した。

(a) 試験方法

試験は以下の手順で実施した。

1) 炭酸塩鉱物と粘土鉱物の除去

地下水から膜を使って濃縮した有機物には、無機の炭酸塩や粘土の微粒子が含まれる可能性が ある。特に炭酸塩はその後の¹⁴C 測定に大きな影響を与える可能性があるため、これを除去する 必要がある。ここでは、塩酸を使って溶液の pH を 1.0 程度として、炭酸塩鉱物の溶解・除去を試 みた。また、溶液を遠心分離器にかけ、粘土鉱物を除去した。1000mL の地下水から膜を使って有 機物等を濃縮した溶液に塩酸を滴下し、pH が 1.0 となることを確認したあと、緩やかに撹拌しな がら 12 時間以上程度静置した。その後、水酸化ナトリウムを滴下して、溶液の pH が 9.0 程度に なるようにした。中和後の溶液を遠心分離器用の容器に移し、10000 回転で 1 時間遠心分離した。 容器底部にたまった沈殿が混入しないよう、留意しながら上澄みを採取した。

2) 硫酸イオンの除去

有機物濃縮に用いた UTC-60 膜は 2 価以上のイオンを濃縮させるため、高濃度の硫酸イオンとマ グネシウム・カルシウムイオンを含んでいる。硫酸イオンの除去のため、ここでは硫酸バリウム の溶解度が低いことを利用し、以下の操作を実施した。上記で遠心分離した後の上澄み液を 40mL ずつ 50mL の PE 製遠沈管に注ぎ分けた。その後、遠沈管に Ba 濃度 1.0mol/L となるように調製し た塩化バリウム溶液を 4.5mL 添加した。溶液添加時に白色の沈殿が生成することを確認し、遠心 ボトルを 3000 回転×30 分遠心分離器にかけた。上澄みを慎重に取り出した後、上澄み 40mL を遠 沈管に入れ、さらに 4.5mL の塩化バリウム溶液を添加した。2 回目の添加では白色沈殿が目視で 確認されることはなかった。この状態で 24 時間程度サンプルを静置した後、3000 回転×30 分間 遠心分離器にかけ、上澄みを採取した。

3) 二価陽イオンの除去

濃縮したマグネシウム・カルシウムイオンに加え、硫酸イオンを除去するために添加したバリ ウムイオンを除去するため、これらのイオンの炭酸塩が比較的溶解度が低いことを利用した。純 水に対して溶解度を超えるように炭酸水素ナトリウム粉末を入れ、飽和の炭酸水素ナトリウム溶 液を調製した。硫酸除去処理後の溶液を 40mL ずつ 50mL の遠沈管に入れ、飽和の炭酸水素ナトリ ウム溶液 4.5mL を加えた。白色の沈殿が生成するのを目視で確認後、2000 回転×5 分遠心分離器 にかけて生成した沈殿を容器底部に沈降させた。上澄みを慎重に取得後、40mL ずつ溶液を注ぎ分 け、さらに 4.5mL の炭酸水素ナトリウム溶液を添加した。この状態で 24 時間程度静置し、24 時 間後 2000 回転×5 分遠心分離器にかけて上澄みを採取した。

- 7-121 -

4) 透析

上記「b. 膜および透析方法の検討」で記載した方法で透析を実施した。ここでは液量を常 に一定に保ちながら試験を実施するため、図 7.4.2-15 に示した試験系を用い、膜でろ過されるの と同じ速度で濃縮液に純水を滴下しながら透析を実施した。途中溶液中の TOC 濃度や EC を適切な タイミングで分析した。



図 7.4.2-15 中規模透析試験に利用した試験系の概念図

(b) 試驗結果

各処理ステップにおけるイオンおよび TOC 濃度を表 7.4.2-9 にまとめた。表における TOC 濃度 は処理対象とした地下水から有機物を濃縮した溶液を 100%として表示した。表の TOC 濃度におけ る「補正値」とは、塩化バリウム溶液や炭酸水素ナトリウム溶液を添加することで、TOC 濃度が 希釈される効果を補正した数値である。表からわかるように、2 価イオン除去処理後までは TOC 濃度は 90%近い値であり、ここまでの操作で失われる有機物が少ないことがわかる。また、イオ ン濃度を見ると、硫酸イオン処理前には 10000mg/L 以上あった硫酸イオン濃度が、硫酸イオン除 去処理によって検出されなくなるまで除去されていることがわかる。また、二価イオン処理前後 を比較すると、マグネシウムイオン (1965→165mg/L)、カルシウムイオン (554→6mg/L)のよう に、炭酸水素ナトリウムを添加することで、二価陽イオンの濃度を大きく減少させることができ ていることがわかる。

表 7.4.2-9 注	海水ベースの地下	くから回収した ^ス	有機物の精製過程に	おけるイオン	/・TOC 濃度
-------------	----------	----------------------	-----------	--------	----------

ᅫᆪᆕᆔᄱᇩ	TOC濃度(%)		陽イオン濃度(mg/L)				陰イオン濃度(mg/L)			
サノノル名	平均値	濃度補正値	Na	к	Mg	Ca	F	CI	Br	SO4
濃縮液	100) —	2035	73	2629	1575	3	35 16	11	12318
粘土除去処理後	99	100	3499	78	2458	757	0	5886	11	10499
硫酸イオン処理後	77	95	2786	35	1965	554	検出されず	18374	9	検出されず
2価イオン処理後	72	89	12058	32	173	6	検出されず	14524	7	検出されず
透析処理後-1	34	42	127	—	—	—	—	183	—	—
透析処理後-2	25	31	4	—	-	-	-	6	-	-

また、地下水からの有機物濃縮液、粘土処理後、硫酸イオン除去処理後のサンプルについては、 溶存有機物の 1H-NMR 分析を実施した。結果を図 7.4.2-16 に示した。図からわかるように、NMR 分 析におけるピークはこれらのサンプルで大きな変化がなく、少なくとも硫酸処理までのプロセスが 有機物の構造に大きな影響を与えていないことが分かった。また、各処理ステップにおける有機物 の大きさの変化を明らかにするため、サイズ排除クロマトグラフィによる分析を実施した。先述の Asahipak GS-32HQ を分離カラムとして用い、溶離液として 0.05M のホウ砂水溶液を用いた。ホウ砂 水溶液の緩衝効果によって、溶液のpHは9.0程度に保たれている状態で分析を実施している。サ イズ排除クロマトグラフィによる分析結果を、図7.4.2-17に示した。1つであったピークが分離す るなどピーク形状が変化していることから、種々の処理によって(イオン強度等が変化することで) 有機物の大きさが変化していることがわかる。しかし、二価イオン処理までの分析結果を見ると、 有機物が流出する時間は15~20分程度であり、大きさが劇的に変化している様子は観察されない。 一方で、透析後には流出時間が10~15分に大きく変化しており、有機物の大きさが大きくなって いることがわかる。二価イオン処理までに上記の大きさが観察されていないことから、透析におい て小さな有機物同士が会合したり、イオン強度が小さくなることで今までイオンを乖離できていな かった官能基からイオンが乖離し、有機物の大きさが大きくなった可能性がある。上記のように、 すくなくとも二価イオン処理までの有機物はほぼ濃縮された溶液における有機物性質を保持して いると考えられる。透析前後では大きさや有機物濃度が大きく変化するため、どのような有機物が 液相から失われた可能性があるのか、さらに詳細を検討する必要がある。

上記透析を実施後のサンプルについて、凍結乾燥を実施したところ粉末状のサンプルを得ること ができた。ただし、やや湿り気があり完全な粉体とはなっていない。今後どのような状態までサン プルを処理すれば¹⁴Cが測定可能かを含めて検討していく予定である。



図 7.4.2-16 処理前後の 1H-NMR 分析の結果



図 7.4.2-17 種々の処理前後のサイズ排除クロマトグラフィ測定結果

d. DAX 樹脂による分離試験

上記で処理を実施した有機物は陸由来の有機物と海由来の有機物が混合している可能性がある。 これらを分離し、それぞれの有機¹⁴C年代を測定することができれば、処分施設等に若い地下水が 流れ込んでいる可能性を示すことができる可能性がある。本研究ではまず疎水性の強さの違いに着 目し、DAX 樹脂への吸着の有無によって有機物が分離できるかを試し、分離前後の有機物の特性が どのような特性を持つのかを調べることを試みた。

(a) 試験方法

試験手順は以下に示す通りである。

1) サンプルの調製

サンプルは透析後のサンプル 200mL を凍結乾燥したものを 20mL の純水に溶解させたものを用いた。この溶液の TOC 濃度を測定したところ、2570mg/L 程度であった。

2) DAX カラムの準備

内径 1cm のテフロン製カラムに樹脂充填部の高さが 10cm になるように、洗浄後(Thurman and Malcolm, 1981)の樹脂を充填した。カラムは塩酸で pH2.0 とした溶液を用いて洗浄して用いた。 3) サンプルの滴下

pH2.0 に調整したサンプル 7.5mL をピペットではかりとり、上記のカラム上部から加えた。カ ラム下流液を取得するためにビーカーをカラム下部に設置した後、カラム下部にあるバルブを開 けて溶液を自由落下させた。液面と樹脂面が一致したところでバルブを閉じ、さらに 7.5mL のサ ンプルをカラム上部から加えて同じ作業を実施した。

4) 水酸化ナトリウムによる回収

上記のカラムに 1.0mo1/L 水酸化ナトリウム溶液を 5.0mL 入れ、カラム下部に PP 製容器を設置 した後、カラム下部のバルブを開けて溶液を自然落下させた。この操作を合計 4 回繰り返し、約 20mL の溶液を採取した。

5) 分析

上記 pH2.0 でカラムを通過した溶液と、水酸化ナトリウムでカラムから抽出した溶液の2 種類 を中和した後、TOC 濃度を測定した。

(b) 試驗結果

上記の試験・分析の結果、DAX 樹脂に吸着しなかった成分の TOC 濃度は 32mg/L(約 15mL)、アル カリで回収された溶液の TOC 濃度は 53mg/L(約 20mL)であった。DAX 樹脂での分離操作を実施する 前の溶液では、TOC 濃度は 2570mg/L、カラムに添加した溶液は 15mL であるため、90%を超えるほと んどの有機物がアルカリ溶液では脱離できないほど不可逆的に DAX 樹脂に吸着していることがわか る。このように精製し凍結乾燥した後の樹脂は極めて疎水性が強く、DAX 樹脂を用いた分離方法で は上手く分離できない可能性が高いと考えられる。DAX 樹脂で分離するタイミングや、他の分離方 法等を再度検討し、地表由来の成分と海水由来の成分が分けられる可能性について、さらに検討し ていく予定である。

- 7.4.2.4 ⁸⁷Sr 化石海水評価法としてのの利用検討
 - (1) 検討の背景および目的

海に囲まれた日本において沿岸域に処分サイトを選定した場合、処分場の建設によって古い海水 (化石海水)に新しい海水が混入する場合があると考えられる。このため、古い海水と新しい海水 が混合していることを評価したり、それらの混合割合を評価するための指標を確立することは、精 密調査において重要であると考えられる。ここでは、ストロンチウム(Sr)の安定同位体の比率で ある⁸⁷Sr/⁸⁶Sr に着目し、これが海水と化石海水の指標となりうる可能性について検討した。

- 7-126 -

⁸⁷Sr/⁸⁶Sr および Sr は(1)岩石中に含まれることが多く、岩石-地下水相互作用の結果地下水中にも 有意な量が存在することが多いこと、(2)⁸⁷Rb が放射壊変して⁸⁷Sr となるため、地下水が接触する 岩石の種類によって⁸⁷Sr/⁸⁶Sr が異なっていること、(3)ある程度原子量が大きいため、様々な反応 において同位体分別がほとんど起きないと考えて良い、という特徴のため、地下水調査で幅広く用 いられている(McNutt, 1999)。上記のような理由から長い時間岩石と接触した地下水における ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr と海水における⁸⁷Sr/⁸⁶Sr は異なっている可能性がある。また、⁸⁷Sr/⁸⁶Sr は温泉への海水の 混入評価に用いられた例もあり(由佐ら, 2004)海水と地下水の区別に利用できる可能性が高いと 考えられる。

本研究では、⁸⁷Sr/⁸⁶Sr が海水と化石海水の混合・混入指標として利用できる可能性を検討することを⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 検討における目的とした。今年度は海水起源と考えられる地下水とその地下水と接触している岩石を対象として以下の検討を実施した。

・ 塩分濃度が高い地下水からのSrの抽出方法(「(2) 塩濃度の高い試料からのSrの抽出」)

・ 地下水からの Sr の抽出と精製(「(3) 古い海水の混合指標としての利用検討」)

・ 地下水と接触する岩石からのSr抽出と精製(「(4) 岩石サンプルからのSrの逐次抽出」)

将来的にそれぞれにおける⁸⁷Sr/⁸⁶Sr を評価することで⁸⁷Sr/⁸⁶Sr の海水・化石海水混合指標としての有用性について検討する。

(2) 塩濃度の高い試料からの Sr の抽出

昨年度までの研究においては、Sr を地下水から濃縮するためにキレート樹脂を用いてきた。キレ ート樹脂は1価の陽イオン溶液の中から、2価のイオンを選択的に抽出する目的に適した樹脂であ るため、塩化アンモニウムで岩石から Sr を抽出した溶液にはキレート樹脂による抽出が有効であ った。一方、海水を起源とした地下水では、2価の陽イオン(マグネシウム・カルシウム)が高い 濃度で共存するため、Sr の回収が妨害される可能性が考えられた。このため、キレート樹脂が有効 に使える地下水の条件と、塩濃度が高い地下水サンプルから Sr を回収する方法について検討した。

a. キレート樹脂が有効に使える地下水についての検討

ここではまず、キレート樹脂が有効に使える地下水について把握するため、①C1 濃度が海水の 10%程度である地下水、②C1 濃度が海水の 40%程度である地下水、③海水を用いてキレート樹脂で の Sr 回収試験を実施した。

(a) 試験方法

試験手順を以下に示す。

樹脂の洗浄

試験に使用したのは、MuromacOT-65(ムロマチテクノス社製)というキレート樹脂である。こ

のキレート樹脂は酸性では陽イオンを吸着せずに H⁺型になる性質があるため、塩酸を用いて樹脂 を洗浄したあと、純水を用いて塩酸を洗い流し試験に用いた。

2) カラムの準備

内径1cmのテフロン製カラムに樹脂の充填高さが15cmになるように洗浄済みの樹脂を充填した。 充填後の樹脂にさらに2.0mo1/Lの塩酸溶液を流して樹脂を再度洗浄した後、純水で塩酸を流し、 さらにpH9.0に調整した水酸化ナトリウム溶液を流した。

3) 溶液の pH 調整とカラムへの滴下

MutomacOT-65 はアルカリ性で2価イオンに対する選択性が顕著になる。このため、水酸化ナト リウム溶液を用いて溶液のpHを9.0 に調整したあと、カラムへと流した。pH 調整中に生じた沈 殿については、ろ過によって除去した。

4) マトリクスの除去

樹脂の粒子間に残存する溶液を流すため、pH を 9.0 に調整した水酸化ナトリウム溶液をカラム に流した。その後、樹脂に吸着している 1 価の陽イオン等を減量するため、2×10⁻² mol/L の塩酸 を 500mL 流した。予備的な試験によって、この操作で Sr が樹脂中に保たれることを確認している。

5) Sr の回収

カラムに 2.0mo1/L 塩酸を流し、10mL ずつ 10本のフラクションに分けて回収した。

6) Sr 濃度の測定

ICP-MS を用いて Sr 濃度を分析した。

(b) 試験結果

図 7.4.2-18 には各サンプル溶液における Sr 回収時の各フラクションの Sr 回収率を示した。図 から分かるように海水に近づくほど回収率は低下し、約 10%海水のときで 65%程度だったのに対し、 海水での Sr 回収率は 10%にまで低下した。このように、海水ベースの地下水ではキレート樹脂に よる Sr の回収率は低く、回収方法としては不適切であると考えられた。



図 7.4.2-18 各フラクションにおける Sr の回収率

b. 塩濃度が高い地下水サンプルから Sr を回収する方法

塩濃度が高い地下水サンプルから Sr を回収する方法として、「炭酸ストロンチウム沈殿で回収 する」方法が考えられる。これは、炭酸ストロンチウムや炭酸バリウムなど2価の炭酸塩の溶解度 が一般的に低いことを利用する方法である。

炭酸ストロンチウムを利用した回収について検討するため、上記と同様に①C1 濃度が海水の 10% 程度である地下水、②C1 濃度が海水の 40%程度である地下水、③海水を用いて炭酸ストロンチウ ム沈殿を利用した回収方法について以下の手順で試験を実施した。

(c) 試験方法

試験手順を以下に示す。

1) 溶液の pH 調整

炭酸塩の沈殿が生じやすいように溶液をアルカリ性にした。溶液をスターラーで撹拌しながら 水酸化ナトリウム溶液を滴下し、溶液の pH が 11 以上になるようにした。

炭酸の添加

純水に炭酸水素ナトリウム粉末を溶解度以上に加え、飽和炭酸水素ナトリウム溶液を調製した。 この溶液を上記の溶液に添加して炭酸ストロンチウムを沈殿させた。炭酸水素ナトリウム溶液添 加の他に、炭酸ガスをバブリングして溶液中の炭酸濃度を上げる操作も実施し、どちらでも沈殿 が生じることを確認し、ここでは操作性の良い炭酸水素ナトリウムを添加する方法を採用した。

3) 固液分離

遠心分離器で2000回転×5分の遠心分離をかけて、固液を分離した後、沈殿を吸わないように 上澄みを除去した。上澄みは0.45μmのフィルタでろ過したあと、Sr 濃度の分析に供した。固体 には硝酸を添加して炭酸塩と思われる沈殿を溶解させたうえ、Sr 濃度分析に供した。

- 7-129 -

4) Sr 濃度測定

上記の操作で得られた上澄み液と沈殿を溶解した硝酸溶液について、適切に希釈したあと ICP-MSを用いて濃度を分析した。

(d) 試験結果

上記の回収試験の結果を表 7.4.2-10 にまとめた。表から分かるように、炭酸ストロンチウムの 沈殿として回収する方法ではいずれの地下水や海水でも 80%を超える高い回収率が得られることが わかった。このため、炭酸ストロンチウムの沈殿を利用する方法は、海水を含めた水のサンプルか らストロンチウムを回収するために有用な方法であると考えられる。

し サン	プル	Sr濃度(mg/L)	溶液量(g)*	回収率(%)
	試験前溶液	0.98	100.1	_
①地下水	上澄み液	0.057	108.4	6.4
	沈殿·溶解液	12.4	8.8	86.7
	試験前溶液	6.17	20.1	_
②地下水	上澄み液	0.135	22.8	2.5
	沈殿·溶解液	13.5	9.5	80.6
	試験前溶液	8.29	20	_
③海水	上澄み液	0.099	25.5	1.5
	沈殿·溶解液	55.8	2.7	81.5

表 7.4.2-10 炭酸ストロンチウム沈殿を利用した Sr 回収試験の回収率

①C1 濃度が海水の10%程度である地下水、②C1 濃度が海水の40%程度である地下水、である。
 *溶液量は回収容器の試験前後の重量から算出しており、回収率計算のときには比重を用いて容積
 に変換した

(3) 古い海水の混合指標としての利用検討

先述のように本研究では海水と化石海水の混合指標としての Sr 同位体の有用性について検討す る。このために、海水における Sr・海水起源の地下水と陸水起源の地下水が混合した地下水におけ る Sr・化石海水と考えられる地点での地下水における Sr について、⁸⁷Sr/⁸⁶Sr の値を比較する。こ れらの地下水における Sr を濃縮するには、上記「(2) 塩濃度の高い試料からの Sr の抽出」で検 討した炭酸ストロンチウムの沈殿を利用する方法が有用である。また、上記の地下水の値と、地下 水と接触する岩石から抽出した Sr における ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr の値を比較することで、地下水中の Sr が岩石 のどのような鉱物と、どの程度の時間オーダーで反応しているのかを推定するための情報を得るこ とができると考えた。そこで今年度の試験では、海水起源と考えられる地下水、およびその地下水 と接触する岩石から Sr を抽出し、その同位体比を比較するためのサンプルを準備した。

a. 試験方法

新しい海水と化石海水が混合している可能性があると考えられるサイトで採取した地下水にお

いて、Srを濃縮・精製して⁸⁷Sr/⁸⁶Sr が測定できるサンプルを調製した。手順は以下に示す通りである。

(a) Sr の濃縮

Sr 濃縮については、上記「(2) 塩濃度の高い試料からの Sr の抽出」の炭酸ストロンチウム沈殿 を利用する方法を採用した。試験手順の詳細は上記の通りである。

(b) Sr の精製

上記で地下水から濃縮した Sr 溶液は種々の共存イオンを含むため、これを低減するため Horwitz et al. (1992a, b)の報告に従って以下のような操作を実施した。

1) Sr 樹脂の洗浄

Sr の精製には Eichrom 社製の樹脂である Sr レジン

(http://www.eichrom.com/products/info/sr_resin.cfm)を用いた。この樹脂は処理する溶液中の硝酸濃度が高くなるとSrに対して高い選択性を示すようになる樹脂であり(図 7.4.2-19)、
 Srの精製に広く用いられている。樹脂は60℃程度の温水に1日浸漬しては上澄み溶液を交換する
 作業を10回程度繰り返し、使用まで純水中で保管した。

2) カラムの組み立てと樹脂のコンディショニング

内径 1cm の市販のテフロンカラムに、樹脂の充填部分の高さが 5cm となるように、洗浄済みの 樹脂を充填した。樹脂には純水と 13M 硝酸を滴下し、コンディショニングした。

3) サンプルの滴下

一般に⁸⁷Sr/⁸⁶Sr の値を測定するのに必要とされる Sr の量は 20µg 程度である。サンプルの滴 下量はサンプル溶液中に Sr が 100µg 含まれるように決定した。また、炭酸ストロンチウムの沈 殿は13M 硝酸で溶解させたため、サンプル溶液のバックグランドは13M 程度の硝酸と考えて良い。 濃硝酸で沈殿を溶解させたのは、先述のように Sr 樹脂は硝酸濃度が高いほど Sr に対して高い選 択性を発揮するためである。

4) マトリックス成分の除去

硝酸濃度:3.5M、シュウ酸濃度:0.005mol/L(0.01M)となるような溶液を調製し、この溶液1.0mL をカラム上部から滴下した。液面と樹脂面が一致するまでカラム下部のバルブを開けて溶液をカ ラムから流出させた。この操作を合計3回繰り返した。さらに上記硝酸+シュウ酸溶液を6.0mL ずつ5回カラムに流した。この操作によってSr以外の種々の陽イオン濃度が低減されることが期 待できる。

5) Sr の回収

0.05M 硝酸溶液を 5 mL ずつ 6 回カラムに滴下した。カラム下部から得られる溶液を 5 mL ずつ採取し、それぞれに含まれる Sr 濃度を ICP-MS で分析した。Sr 濃度が高いフラクションを選んで

- 7-131 -

⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 分析用のサンプルとした。



図 7.4.2-19 Sr 樹脂における硝酸濃度とイオン選択性の関係

b. 試験結果

海水から炭酸ストロンチウムの沈殿を使って Sr を濃縮した溶液について、Sr 樹脂で処理した前 後のイオン濃度を表 7.4.2-11 に示した。表から分かるように、Sr 樹脂を用いた処理によって Sr 以 外のイオン濃度を大きく低減することが可能である。海水においてはそれでも 2 価の共存イオン濃 度が高いこともあり、Sr 回収率は約 70%程度に留まった。このため、多少回収率への影響はあるも のの、海水や海水由来の地下水から Sr を濃縮し、精製することができたと考えられる。

ノオン活籾	イオン濃度(mg/L)					
「オノ住浜	樹脂処理前	処理後				
С	12	6.4				
Na	8700	0.35				
Mg	3900	<9.5E-3				
Cl	35	<2.0				
K	54	<2.9E-3				
Ca	650	<1.1				
Min	0.059	<2.7E-3				
Fe	2.7	<0.12				
Sr	14	5.9				
液量(mL)	9.5	15				

表 7.4.2-11 Sr 樹脂処理前後のイオン濃度比較

(4) 岩石サンプルからの Sr の逐次抽出

岩石中の Sr の値と地下水中の Sr の値を比較するため、岩石に対して逐次的に薬液を作用させて Sr を抽出する「逐次抽出」を実施した。抽出に用いたのは、①交換性の Sr を抽出できると考えら れる塩化アンモニウムを添加した模擬地下水、②炭酸塩成分に含まれる Sr を抽出できる酢酸ナト リウム、③鉄やマンガン鉱物など塩酸に溶出する鉱物に含まれる Sr を抽出できる 6.0mol/L 塩酸、 である(伊藤, 1981, 1982);金井, 1993、金井ら, 1996)。

a. 試験方法

逐次抽出および抽出した Sr の精製手順は以下の通りである。

1) 岩石の準備

上述の地下水と接触する岩石200gを粉砕し、全ての岩石が2mmメッシュを通過するようにした。 粉砕した岩石は風乾させずポリ袋に入れて使用まで保管した。

2) 模擬地下水の調製

岩石と接触している地下水の組成を参考にして、主要なイオン濃度が地下水と同程度になるように、純水に試薬を溶解させて模擬地下水を調製した。模擬地下水の pH は地下水と同じく 7~8 になるように NaOH または HC1 溶液で調整した。

3) 岩石のリンス

岩石間隙には地下水の Sr が多く含まれていると考えられるため、模擬地下水を用いて岩石粉末 をリンスした。岩石 50g を 500mL の遠心ボトルに入れ、模擬地下水を口元まで満たした後、ハン ドシェイクした。その後岩石粉末が沈降してからさらに 5000 回転×1 時間遠心分離し、上澄み液 を交換する作業を 2 回実施した。

4) アンモニウムイオン入り模擬地下水による抽出

上記で調製した模擬地下水にさらにアンモニウムイオン濃度が 1.0mol/L になるように塩化ア ンモニウムを添加した溶液を、リンス終了後の岩石と接触させた。この操作では、アンモニウム イオンとの交換によって抽出できる Sr イオンを得ることができると考えられる。アンモニウムイ オンと交換可能な成分が確実に抽出できるように、溶液接触後 4 日後に上澄み液を交換してさら に3 日間岩石と溶液を接触させた。4 日後、さらに3 日後の 2 つの溶液を併せて 0.2 μm のフィル タでろ過し、模擬地下水で抽出された Sr 溶液とした。

5) 酢酸カリウム溶液による抽出

上記で固液分離した固相に対して、模擬地下水 500mL を入れてリンスした。これは、模擬地下 水で抽出された Sr の固相への影響を低減するためである。リンス後の固相に対してさらに 0.1mol/L 酢酸カリウム溶液を加えた。このとき溶液の pH は酢酸を使って 5 に調整した。岩石粉 末をよく分散させた後、1 回/日ハンドシェイクして 4 日間岩石と酢酸溶液を接触させた。4 日後 上澄み溶液を新たに調製した酢酸カリウム溶液と交換し、さらに3日間岩石と溶液とを接触させた。4日後、さらに3日後の酢酸カリウム溶液を併せて0.2µmのフィルタでろ過したものを酢酸で抽出した Sr を含む溶液とした。

塩酸での抽出

上記で固液分離した固相に対して、模擬地下水を入れてリンスした後、6.0mo1/L 塩酸を入れ、 上記と同様の手順で Sr を抽出した。

7) 模擬地下水における Sr の濃縮・精製

模擬地下水で抽出された Sr については、通常の地下水と同様に炭酸ストロンチウムの沈殿として Sr を回収した後、硝酸で溶解させて Sr 樹脂による精製を実施した。

8) 酢酸溶液における Sr の濃縮・精製

事前の検討により、酢酸溶液では炭酸ストロンチウムの沈殿を用いる方法による Sr の回収率が 低いことがわかった。このため、酢酸溶液に対してはキレート樹脂である MuromacOT-65 樹脂と接 触させて Sr を樹脂上に濃縮させた後、塩酸で回収した。塩酸溶液にさらに硝酸を入れて硝酸濃度 を高めた後、Sr 樹脂を使って Sr 以外のイオン濃度を低減した。

9) 塩酸溶液における Sr の濃縮・精製

塩酸溶液に対しては、アルカリで性能を発揮するキレート樹脂や炭酸ストロンチウムの沈殿を 使う方法での回収は困難である。このため、Sr 樹脂を直接作用する方法を以下のように適用した。 塩酸溶液は必要な Sr 量が確実に確保できる液量をテフロン製ビーカーに取り分けた後、90℃で緩 やかに蒸発乾固させた。蒸発乾固物に濃硝酸を少しずつ加えて溶解させ、この上澄み液をテフロ ン製フィルタでろ過したろ液を精製用のサンプルとした。この上澄み溶液の精製は Sr 樹脂を用い て、上記と同様の手法で実施した。

b. 試験結果

以上の操作を実施した結果、各抽出成分に対して⁸⁷Sr/⁸⁶Sr を分析するのに十分な量を確保するこ とができた。今後これらのサンプルの⁸⁷Sr/⁸⁶Sr を分析し、化石海水の混合指標としての⁸⁷Sr/⁸⁶Sr の有用性について検討する。

7.4.3 遅い流れの指標となる物質

7.4.3.1 拡散による同位体分別

地下水流動が非常に遅い場合には、拡散が支配的な物質輸送形態となる。このような場合には、拡 散によって分別する物質を指標として評価するのが有効であると考えられる。このようなものの代表 的なものに、 δ^{37} C1 と δ^{81} Br がある。C1 は 35 C1 と 37 C1 の比率が75.53%と24.47%となっており、Br は ⁷⁹Br と 81 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、拡散係数によっ て分別することが知られている(Eggenkamp and Coleman., 2009)。前フェーズからこの評価方法を 提案するとともに、岩盤を対象に分別係数の計測を実施している。昨年度は、セラミックディスクと 勇知層を対象に拡散試験を実施した。今年度は、声問層、稚内層、花崗岩を対象に拡散試験を実施す る。

(1) 分別係数の計測方法

提案した分別係数の計測方法は、一般的に拡散係数を求める際に実施される Through-diffusion 試験と同じであり、定常状態では³⁵C1 と³⁷C1 のフラックス比が拡散係数比と同じになることを利用した ものである。図 7.4.3-1 に示す Through-diffusion 試験で拡散試験を実施し、高濃度と低濃度のタン クの同位体比の差をとると分別係数は次式で与えられる。

$$10^{3} \ln \alpha = 10^{3} \ln \frac{R_{H}}{R_{L}} \approx \delta^{37} C l_{H} - \delta^{37} C l_{L}$$
(7.4.3-1)

 α は³⁵C1 と³⁷C1 の拡散係数比(=D_{C1-35}/D_{C1-37})、 δ ³⁷C1_Hは高濃度タンクの δ ³⁷C1、 δ ³⁷C1_Lは低濃度タン クの δ ³⁷C1 である。

ただし、フラックスが定常状態に達するのに時間がかかり、その誤差の影響を 5%以下にするために は以下の基準を満たす必要がある。

$$\frac{Dt}{nL^2} > 4 \tag{7.4.3-2}$$

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、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上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 7.4.3-2 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 7.4.3-1 Through-diffusion 試験の概念図



図 7.4.3-2 濃度変化を考慮した分別係数の評価方法

(2) 拡散試験の試験方法

Through Diffusion 法による拡散試験の手順は以下の通りである。

a. 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。岩石試料は間隙水とイオン 強度が同程度になるように調製した NaNO₃の溶液に浸漬し、この状態で浸漬した容器の内部をロー タリーポンプで吸引して岩石間隙が NaNO₃溶液で飽和されるようにした(図 7.4.3-3)。今回試験に 用いたのは天然の岩石であり、間隙水に C1 や Br イオンが含まれる。拡散試験前にこれらの影響を 極力排除するため NaNO₃溶液への浸漬を続け、NaNO₃溶液を定期的に交換することで、間隙水中の C1 や Br 濃度を低下させた。イオン強度が間隙水と同程度になるようにしたのは、粘土の膨潤等によ るスレーキングを防ぐためである。



図 7.4.3-3 岩石間隙を水で飽和させる試験手順の概念図 水を張った容器に岩石を入れ(まだ水には浸漬しない)、容器全体をポンプで脱気する(左図)。 その後岩石コアを水に浸漬し、さらにポンプでの脱気を継続する(右図)。

b. アクリル板やセルへの固定

内径 53mm の穴が空いたアクリルの板にエポキシ樹脂系の接着剤を用いて、岩石を固定した。固 定が難しい試料については、ディスクをゴムスリーブで巻いて加圧し、固定する拡散セルを用いた。 c. 拡散セルの組み立て

上記の操作でアクリル板に固定した岩石を真ん中にして、それを挟み込むように2つのセルを合わせて拡散セルを組み立てた。一度 NaNO₃ 溶液を両方のセルに入れて物理的な水漏れがないかを確認した。各セルの大きさは 350mL あるいは 500mL のものを使用した。

d. 溶液の調製

試験に用いる溶液として、臭化セシウムと塩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 375.7gと臭化セシウム 133.2g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」試験溶液とイオン濃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 232gを 5Lの純水に溶解させ、さらに非吸着 性のトレーサーとして重水を加えた。重水は試験溶液 5L に対して 25mL を加えた。これによって、 低濃度側のδD は 23000‰程度になる。硝酸ナトリウムを選定したのは、硝酸イオンがその後の Br や C1 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。

- 7-137 -

e. 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撹拌した。

f. サンプリング

所定の時間経過後、低濃度側のセルから少量の試料を抜き取り、ろ過・希釈した後 IC で C1 濃度 を、ICP-MS で Cs・Sr・Br 濃度を定量するためのサンプルとした。また、同じタイミングで「高濃 度側」試験溶液についてもサンプリングし、重水測定用のサンプルとした。

g. 分析

C1 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 NO₃ 中 C1 濃度を測定するこ とになるが、IC により C1 と NO₃ のピークが分離可能であることを確認できた。Cs・Sr・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。 δD は波長可変半導体レーザーを用いた波長スキャンキャビティリングダウン 分光法(Wavelength-Scanned Cavity Ring-Down Spectroscopy : WS-CRDS 法(例えば Kerstel et al., 2002))により分析した。重水を入れた溶液と溶液の調製に用いた純水を保管しておき、これらを 混合することで検量線を作成して「高濃度側セル」における重水の混合割合を評価した。このため、 重水の濃度は%で記載している。

h. pH 依存性の確認

また、一部の試料では、拡散試験時のpHを6と9.5に調整し、試験の期間中このpHを保つよう にpHの調整を繰り返す試験を実施した。溶液のpHはNaOHとHNO3を添加して調整した。

(3) 拡散試験の結果

拡散試験には、表 7.4.3-1 に示すように、声問層、声問層稚内層遷移域、稚内層、オーストラリア大鑽井盆地の Marree 地点、Richmond 地点、瑞浪花崗岩を対象に実施した。この結果を図 7.4.3-4 ~7 に示す。

拡散試験結果は概ね同じ地点の岩石で同程度の値をとる。ただし、声問層と稚内層では、間隙率 が 60%と 30%と大きく異なるため、声問層の方が 3 倍程度大きい。同じ試料における C1 と Br は、 ともに 1 価の陰イオンのため、拡散係数はほぼ同じ値となる。ただし、花崗岩での拡散試験結果で は、拡散係数にバラツキが大きい。これは、拡散試験の試料長を 5mm と薄くしたため、ショートカ ットする経路が形成されてしまったためと考えられる。花崗岩の拡散係数は非常に小さく 1×10⁻¹³

- 7-138 -

~1×10⁻¹² m²/s 程度が國丸ほか(2012)で報告されている。このような拡散係数での試験は、他の1×10⁻¹¹~1×10⁻¹⁰ m²/s に比べて、同程度の物質量を得るためには、100 倍の時間がかかる。これを緩和するために、試料長を短くしたが、異なる経路が形成された可能性がある。

同位体分別については、全ての結果で分別が確認されている。このため、拡散による輸送であれ ば分別が発生することが確認できた。また、分別の大きさは、試料によってそれぞれであり、今回 の結果では拡散係数が大きい方が、分別が大きい結果となっている。このため、分別から輸送の評 価をする場合には、対象となる岩石で分別係数を計測して評価を行うことが必要である。

地層名	岩種	孔名	深度	直径	厚さ	タンク容量	Cl濃度	Br濃度	CI拡散係数	Br拡散係数
			m	cm	cm	ml	mg/l	mg/l	m²/s	m²/s
稚内層	頁岩	HCD-3孔	752.45~752.97	5.16	1.08	1000	19700	21500	4.60E-11	4.70E-11
稚内層/声問層	頁岩/泥岩	HCD-3孔	842.36~842.52	5.17	1.13	1000	19700	21600	4.80E-11	4.90E-11
声問層	泥岩	HCD-3孔	925.12~925.62	5.2	1.08	1000	19700	21300	1.30E-11	1.50E-11
Rolling Down Group	頁岩	Marree	22.27	5.03	0.99	300	19200	20700	6.00E-11	6.20E-11
Rolling Down Group	頁岩	Marree	119	5.06	1.12	1000	19500	21200	8.50E-11	1.10E-10
Rolling Down Group	頁岩	Marree	168.8	5.12	1.2	300	18700	20600	4.70E-11	5.00E-11
Rolling Down Group	頁岩	Richmond	74	5.09	0.97	300	19300	20900	7.60E-12	7.60E-12
Rolling Down Group	頁岩	Richmond	134	5.05	0.95	300	19300	21000	9.00E-12	9.40E-12
Rolling Down Group	頁岩	Richmond	165	5.13	0.71	300	19100	21100	8.80E-12	7.50E-12
土岐花崗岩	花崗岩	13MI37	11.00~11.40	5	0.5	500	14800	21700	9.10E-11	9.10E-11
土岐花崗岩	花崗岩	13MI37	11.00~11.40	5	0.5	500	14800	21700	1.50E-11	1.50E-11
土岐花崗岩	花崗岩	13MI37	11.00~11.40	5	0.5	500	14800	21700	3.80E-12	2.10E-12

表 7.4.3-1 拡散試験条件と拡散試験結果







(2)同位体の変化









(2)同位体の変化

図 7.4.3-5 Marree(GAB) のコアによる拡散試験結果







(2)同位体の変化

図 7.4.3-6 Richmond(GAB) のコアによる拡散試験結果



図 7.4.3-7 土岐花崗岩(GAB)のコアによる拡散試験結果

また、拡散係数および同位体分別に対する pH の影響を明らかにするため、来待砂岩の試料を用 いた拡散試験を実施した。その結果を図 7.4.4-8 に示した。この試験では、C1 や Br 等の保守的な トレーサーに加えて、Cs や Sr についても結果を示した。C1 や Br 濃度の経時変化は 2 つの pH でほ とんど変わりがなかったが、pH9.5 における拡散ではわずかに拡散係数が減少する傾向がみられた。 これは、pH が高くなるほど岩石表面がマイナスに帯電する傾向が強くなり、やや陰イオンの拡散す る経路が狭くなったものの、対象とした岩石では pH を 6.0 と 9.5 とでその差がわずかであること を示している。この拡散係数の差が同位体比においてどのような差となるのかを、今後の分析で明 らかにしていく。また、陽イオン (Cs および Sr) については、特にその時間遅れにおいて pH の影 響が顕著となった。高い pH では岩石表面がマイナスに帯電するため、一般的に陽イオンの吸着量 は増大する傾向にある。しかし、本試験ではむしろ pH9.5 の場合の方が、濃度の立ち上がりにおい て時間遅れがみられない傾向が観察された。このため、Cs や Sr については岩石にイオンが吸着し てから岩石-水界面を移動する「表面拡散」の影響が大きい可能性がある。拡散係数や同位体比に およぼす溶液 pH の影響については、今後必要に応じて試験ケースを増やしその傾向をさらに把握 していく必要があると考えられる。

C1 および Br の分別係数および拡散係数に与える岩石特性(間隙率や間隙径)および溶液特性(pH やイオン強度)の影響を評価する。この結果を基に、現場試験や現地調査において C1 や Br の同位 体比がどのような使い方ができるのかを検討していく。

- 7-143 -



図 7.4.3-8 拡散試験における濃度経時変化の pH 依存性 それぞれ、C1(左上)・Br(右上)・Cs(左中)・Sr(右中)・重水(下)の結果を示している

7.4.4 まとめと今後の課題

希ガス採取時に脱ガスが激しいため、サンプリング方法(原位置平衡式、循環式、圧力制御式)につ いて検討した。原位置平衡式サンプラーは、透過性の高いシリコンチューブを水中でガスを交換する 材料に使うこととし、捕集速度とHe の漏出速度について試験を行った。この結果、原位置に3週間程 度に安置し、回収後1時間以内に封入できれば、適切にサンプリングできることが確認できた。また、 循環式と圧力制御式を原位置に適用し、その適用性を確認した。圧力制御式の方が、Ne 濃度の保存性 が高かったものの、同時に採取したサンプルのバラツキが大きかった、循環式はバラツキは少ないが、 脱ガスが大きい結果となった。今後、原位置平衡式サンプラーを原位置に適用していくとともに、各 方法を同一の地点で比較検討し、適用性の確認を行う。また、立坑掘削により水圧などが低下し、ガ スが分離している場合も想定されるため、このような状態での補正方法について検討していく必要が ある。

比較的速い流れの指標となる物質として、(1)トリチウム、(2)無機¹⁴C、(3)有機¹⁴C、(4)⁸⁷Sr/⁸⁶Sr について検討した。(1)トリチウムについては、濃縮法・(トリチウム測定の妨げとなる)蛍光染料の 除去法に関する試験を実施した。濃縮法や除去法を今年度の検討によって確立できたため、実試料に おいて濃縮率を変えた試料におけるトリチウム濃度を比較し、最適な濃縮率等を提案していく。(2) 無機¹⁴C については前処理方法による¹⁴C の差異について検討した。その結果、地下水サンプル中の無 機¹⁴C を測定するには、ガス追い出し法が適していることが判明したため、今後のサンプルにおいて はこの方法を適用する。(3)有機¹⁴C は海水由来の有機物と地表由来の有機物を精製・分離する方法に ついて検討し、海水由来の地下水から濃縮した有機物を精製する方法を確立できた。今後海水・地表 由来の有機物を分離し、それぞれ¹⁴C を分析することでそれぞれの地下水の混合指標としての有機¹⁴C の有用性を検討していく予定である。(4)⁸⁷Sr/⁸⁶Sr については、現海水と化石海水の混合指標として の有用性を検討するため、海水・化石海水・これらが混合した地下水およびこれらが接触する岩石か ら Sr を抽出・精製した Sr における⁸⁷Sr/⁸⁶Sr の値を比較し、海水/化石海水の 混合指標としての⁵⁷Sr/⁸⁶Sr の有用性を議論する予定である。

遅い流れの指標となる物質について、拡散時の分別を利用した拡散の寄与の評価方法を検討してい る。今年度は現在調査を行っている幌延や瑞浪などの岩石について拡散試験を実施し、拡散係数を求 めるとともに同位体分別が発生することを確認した。ただし、拡散係数が小さい試料では、拡散に時 間がかかり分析可能な量のサンプルの採取が困難な場合がある。このため、拡散試験の方法などつい て検討していく必要がある。また、原位置での評価方法を検討していく必要がある。さらに、拡散係 数や分別係数に与える pH 等の溶液条件の影響についても検討しており、岩石の性質による差異と併せ て、どのような岩石-地下水では同位体分別がどのように起きるのかを推察する情報を集積していく予 定である。 参考文献

- Andrews, J. N., Fontes, J. C., Michelot, J. L. and Elmore, D. (1986): In-situ neutron flux, 36C1 production and groundwater evolution in crystalline rocks at Stripa, Sweden. Earth Planet. Sci. Lett. 77, 49-58.
- Andrews, J. N. (1985) : The isotopic composition of dariogenic Helium and its use to study groundwater movement in confined aquifers. Chemical Geology. 49, 339-351.
- Argento, D. C., Stone, J. O., Fifield, L. K. and Tims, S. G. (2010): Chlorine-36 in seawater, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 268, 1226-1228.
- Busenberg, E. and Plummer, L. N. (2000): Dating young ground water with sulfur hexafluoride-Natural and anthropogenic sources of sulfur hexafluoride. Water resources of research, 36, 3011-3030.
- Eggenkamp, H.G.M., Coleman, M.L. (2009): The effect of aqueous diffusion on the fractionation of chlorine and bromine stable isotopes, Geochim. Cosmochim. Acta 73, 3539-3548.
- 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.
- Florkowski, T., Kostka, T. and Kotas, M. (1992): Measurement of Underground Neutron Flux, Nuclear Geophysics, 6, 2, 243-248
- Gurtler, B.K., Vetter, T.A., Perdue, E.M., Ingall, E., Koprivnjak, J.-., Pfromm, P.H., 2008. Combining reverse osmosis and pulsed electrical current electrodialysis for improved recovery of dissolved organic matter from seawater. J. Membr. Sci. 323, 328-336.
- Heaton, R., Lee, H., Skensved, P. and Robertson, B. C. (1990): Alpha-induced nutron activity in materials, Nuclear Geophysics, 4, 4, 499-510.
- Horwitz, E.P., Dietz, M.L., and Chiarizia, R., (1992a): The application of novel extraction chromatographic materials to the characterization of radioactive waste solutions, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 161 (2), 575-583.
- Horwitz, E.P., Chiarizia, R., and Dietz, M., (1992b): Novel strontium-selective extraction chromatographic resin, Solvent Extraction and Ion Exchange, 10 (2), 313-336.

- 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.
- JNC(2003):Data book on groundwater chemistry in the Tono area, Tono Geoscience Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN 7450 2003-001.
- Kerstel, E. R. Th., Gagliardi, G., Gianfrani, L., Meijer, H. A. J., Van Trigt, R., and Ramaker, R., (2002) Determination of the ${}^{2}\text{H}/{}^{1}\text{H}$, ${}^{17}\text{O}/{}^{16}\text{O}$, and ${}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$ isotope ratios in water by means of tunable diode laser spectroscopy at 1.39 μ m. Spectrochimica Acta - Part A Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 58, 2389-2396.
- KASHIWAYA, K., HASEGAWA, T., NAKATA, K., TOMIOKA, Y., MIZUNO, T. (2015): Multiple tracer study in Horonobe, northern Hokkaido, Japan: 2. Depletion of chlorofluorocarbons (CFCs) estimated using ³H/³He index and lumped parameter models, Journal of Hydrology, 524, 111-122.
- Lehmann, B.E. and Loosli, H.H. (1991):Isotopes Formed by Underground Production, In: Pearson, F.J. (Eds), Applied Isotope Hydrogeology- A Case Study in Northern Switzerland, Studies in Environmental Science, Elsevier, p439.
- 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., and Igarashi T. (2003): Changes in isotope ratio and content of dissolved helium through groundwater evolution, Applied Geochemistry, Vol.18, pp.719-738.
- Mahara, Y., Hasegawa, T., Miyakawa, K., and Ohta, T. (2008): Correlation between dissolved 4He concentration and ³⁶Cl in groundwater at the Aspo, Sweden. Applied Geochemistry, Vol. 23, pp. 3305–3320.
- MucNutt, R. H. (2001): Strontium isotopes in Environmental Tracers in Subsurface Hydrology published by Kluwer Academic Publishers, P 233.
- Nagasawa, S., Kitagawa, H., Nakanishi, T., Tanabe, S., Hong, W. (2013): An approach toward automatic graphitization of CO₂ samples for AMS ¹⁴C measurements. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 294, 266-269.
- Phillips F. (1999): Chlorine-36, Environmental tracers in subsurface hydrology. (Edited by Cook, P. and Herczeg, A.L.), pp. 299-348, Kluwer Academic Publishers.

Plummer L.N. and Bunsenberg(2006): Chlorofluorocarbons in the atmosphere (Chapter 2) in Use

of chlorofluorocarbons in hydrology -a guide book-, IAEA.

- Sheldon, A. L. and Solomon, D. K. (2003): Radiogenic helium in shallow groundwater within a caly till, southwestern Ontario, Water Resources Research, 39, 12, 1331, doi: 10.1029/2002WR001797.
- Shibata, K., Iwamoto, O., Nakagawa, T., Iwamoto, N., Ichihara, A., Kunieda, S., Chiba, S., Furutaka, K., Otuka, N., Ohsawa, T., Murata, T., Matsunobu, H., Zukeran, A., Kamada, S. and Katakura, J. (2011): "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering, J. Nucl Sci. Technol, 48, 1, 1-30.
- Thurman, E.M., Malcolm, R.L. (1981): Preparative isolation of aquatic humic substances. Environmental Science and Technology 15 (4), 463-566.
- Tolstikhin I., Lehmann B. E., Loosi H. H., and Gautschi A. (1996) : Helium and Argon isotopes in rocks, minerals, and related groundwaters : A case study in northern Switzerland. Geochim. Cosmochim. Acta, 60, 1497-1514.
- USGS(2015a): http://water.usgs.gov/lab/chlorofluorocarbons/sampling/ (2015/03/30 閲覧)
- USGS(2015b):http://water.usgs.gov/lab/sf6/sampling/(2015/03/30閲覧)
- Wassenaar, L., Aravena, R., Fritz, P. (1990): The geochemistry and evolution of natural organic solutes in groundwater. Radiocarbon 31 (3), 865-876.
- 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.
- 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(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. 伊藤和男(1981):河口域底でい中の金属の化学形に基づく選択的溶解 I. 鉄とマンガン,分析化学,

30, 518-524.

- 伊藤和男(1982):河口域底でい中の金属の化学形に基づく選択的溶解 II. 亜鉛、銅および鉛,分析化 学,31,657-662.
- 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

- 大森 一秋, 新宮 信也, 増田 薫, 青才 大介, 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 (2012 年度), JAEA-Data/Code 2013-024
- 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,前村 庸之,木村 仁,菱谷 智幸,水野 崇,竹内 竜史,岩月 輝希(2014):超深地層研究 所計画(岩盤の水理に関する調査研究)研究坑道掘削に伴う地下水流動場及び地下水水質の変化を 考慮した地下水流動のモデル化・解析 2011 年度,2014/06 JAEA-Research 2014-010
- 金井豊 (1993): 選択的分別溶解法による堆積物中のキャラクタリゼーション,ぶんせき,1993, p980-982.
- 金井豊,奥山康子,坂巻幸雄(1996):分別溶解法による堆積物中の元素の存在形態の研究-実験的 検討と花崗岩質礫岩への応用,地質調査月報,47,413-425.
- 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):花崗岩試料を用いた収着・拡散試験および間隙率測定、日本原子力研究開発機 構、JAEA-Data/Code2012-013.
- 繰上 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.
- 小坂 寛, 三枝 博光, 尾上 博則, 竹内 竜史(2010):超深地層研究所計画(岩盤の水理に関する調査研究) 長期揚水試験計画策定のための水理地質構造のモデル化・地下水流動解析, JAEA-Research 2010-037
- 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.

- 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
- 富岡 祐一,中田 弘太郎,長谷川 琢磨,後藤 和幸(2007):地下水年代測定評価技術の開発(その9) -溶存有機物を用いた 14C 地下水年代測定方法の開発-.電力中央研究所報告 №7039.
- 長尾 誠也,2008 水中腐食物質の分離法 in 環境中の腐食物質-その特徴と研究法-, (監修)日本腐 食物質学会, (編著)石渡 良志,米林 甲陽, 宮島 徹,三共出版株式会社 発行.
- 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.
- 中田弘太郎、長谷川琢磨、東原知広(2006b):地下水年代測定評価技術の開発(その2)-He 濃度の 深度方向分布を利用したオーストラリア大鑽井盆地における He フラックスの評価-、電力中央研 究所 研究報告-、N05066.
- 中田 弘太郎,長谷川 琢磨,柏谷 公希, 兒玉 宏樹,宮島 徹 (2011): 蛍光染料を含む地下水の水質 評価における前処理法の提案-ボーリング調査およびトレーサー試験におけるイオン濃度や同位 体比の正確な評価のために-.電力中央研究所報告 N10040.
- 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(2014):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(2014): 瑞浪超深地層研究所、 Accessible at: http://www.jaea.go.jp/04/tono/shisetsu/miu.html
- 日本分析化学会北海道支部編,水の分析 第4版,化学同人,125-129(1994).

長谷川琢磨、中田弘太郎、富岡祐一、後藤和幸、柏谷公希、濱 克宏、岩月輝希、武田匡樹、小坂 寛

(2010): 地下水年代測定評価技術の開発(その12), 一東濃地域における4Heと14C地下水年 代測定の適用性検討一.電力中央研究所報告、N10001.

長谷川琢磨、馬原保典、中田弘太郎、秦野輝儀(2006):地下水年代測定評価技術の開発(その4)、

-³⁶C1 と ⁴He による地下水年代測定法のオーストラリア大鑽井盆地における検証-、電力中央研究 所 研究報告、N05068.

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(1995):第3版 水質調査法,丸善.

菱谷 智幸,前村 庸之,木村 仁,尾上 博則,三枝 博光,水野 崇(2013):超深地層研究所計画(岩盤の水理に関する調査研究)研究坑道掘削に伴う地下水流動場及び地下水水質の変化を考慮した地

下水流動のモデル化・解析 2010 年度 JAEA-Research 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

一、電力中央研究所 研究報告:U97052.

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

一、電力中央研究所 研究報告:U97052.

馬原保典(2009):地下水年代の測定、地下水学会誌、Vol.51, No.1, pp.55-59.

馬原保典、長谷川琢磨(2003):スウェーデン・ハードロック地下研究施設における高レベル廃棄物処

分のための国際共同研究(その7)-地球化学的手法を用いた地下水調査手法の原位置データによ る検証-、電力中央研究所研究報告、U02040.

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).

由佐 悠紀,柴田 知之,芳川 雅子 (2004):別府温泉南部域の温泉水への海水混入の検出(1)ストロ ンチウム同位体による試み,大分県温泉調査研究会報告 第55号,

8. まとめと今後の課題

8.1 トレーサー試験に係わる室内試験

室内試験では以下の3つの事項を実施した、すなわち(1)原位置トレーサー試験の試験条件を決定す ることを目的とした岩石へのルビジウム(Rb)・バリウム(Ba)の吸着・模擬トレーサー試験、(2) 種々の手法で取得した分配係数の比較、(3)トレーサー試験で頻繁に使用される蛍光染料についての検 討、である。

(1)では、岩石固相を入れないブランク試験、粉末状やディスク状の試料を用いたバッチ試験、コア を充填したカラムへの通液による模擬トレーサー試験、カラムへ通液した後さらに溶液の投入口から 溶液を回収する模擬単孔式トレーサー試験、を実施した。岩石固相を入れないブランク試験では、模 擬地下水に対して Rb や Ba を入れたときの濃度変化を観察し、模擬地下水においては Rb:2mg/L、Ba: 1mg/L が数週間程度の期間安定的に存在できることを確認した。また、粉末等を用いたバッチ試験で は岩石固相と接触後の溶液中の Rb や Ba が有意に減少することから、Rb:2mg/L、Ba:1mg/L で有意な 分配係数が見込めることを示した。さらに、模擬トレーサー試験や模擬単孔式トレーサー試験では、 保存性トレーサーに対し収着性トレーサーの明確な時間遅れは観察されないが、ピーク濃度等が分配 係数に従って減少する様子が観察され、原位置試験でも類似のデータが得られることが期待された。 以上より、原位置トレーサー試験の投入濃度として Rb:2mg/L、Ba:1mg/L は適切であることを示した。

上記の試験や原位置試験の結果から、Rb、Ba について分配係数が取りうる範囲を算出したところ、 Rb の分配係数は 0.004~3.7 mL/g、Ba の分配係数は 0.01~19.9 mL/g 程度となり、Rb で最大約 100 倍、Ba で最大 1990 倍程度の差が生じた。最小値を示したのは単孔式トレーサー試験の解析結果であ り、最大値を示したのは孔間式トレーサー試験の結果であった。原位置試験で得られた値が大きく異 なることから、原位置試験の再現に用いたモデルの妥当性等については、室内試験結果と併せて検証 が必要であると考えられた。ディスク状吸着試験では、厚さ 1cm のディスク状試料に対して見かけの 吸着平衡に達した約 1000 時間後の溶液濃度の減小から分配係数を算定した。一方、孔間トレーサー試 験では、試験は十数時間で終了し岩石基質への非定常の吸着拡散現象から分配係数を同定しており、 吸着平衡が十分に達成されていない可能性もある。しかし、孔間式トレーサー試験は粉末状のバッチ 試験も含めた比較において最大値を示した。トレーサー試験では長年の水-岩石相互作用で変質した割 れ目近傍の岩石基質を対象としていることや、割れ目充填物への吸着の可能性も考えられた。

原位置トレーサー試験に用いられる蛍光染料は安価で分析が容易であることなどが大きな利点であ るが、岩石等への吸着・光分解等の可能性が指摘されている。本研究では、トレーサー試験の条件を 考慮して吸着試験や光・熱に対する耐久試験を実施した。その結果、今回対象とした花崗岩に対して は蛍光染料の吸着は少なく、実験系を構築する部材への吸着も顕著ではなかった。また、ポンプで発 生の可能性がある熱に対しても、耐性が確認できた。これらの結果から、原位置トレーサー試験で用

- 8-1 -

いた蛍光染料は保存性トレーサーとして機能していた可能性が高いと推察された。

8.2 ラドン濃度計測による割れ目調査技術の開発

ラドン濃度計測による割れ目調査技術について、スイスのグリムゼルサイトにおいて適用性試験を 実施したが、我が国の堆積岩や結晶質岩での適用性を確認することを今フェーズの課題としている。

我が国の堆積岩への適用性確認については、評価対象割れ目の母岩のラドンフラックスの情報が必 要である。今年度は、多胡砂岩、藤枝砂岩、幌延泥岩を事例として、堆積岩のラドンフラックスの評 価について検討した。これらの岩石のラジウム含有量を測定すると、幌延泥岩>藤枝砂岩>多胡砂岩 の順に大きい。実際にラドンフラックスを測定したところ、試料の厚さを14cmに限定した場合、延泥 岩>藤枝砂岩>多胡砂岩の順に大きい。この結果は、ラジウムの含有量がラドンフラックスへ影響を 与えていること示している。また、多胡砂岩、藤沢砂岩と蛭川花崗岩の 10cm×10cm の方形サンプルの 厚さを順次変えてラドンフラックスを測定したところ、岩石の厚みが増すにつれて、フラックスは増 加するが、フラックスの増加率は頭打ちとなる。この傾向は花崗岩>藤枝砂岩>多胡砂岩の順で顕著 であり、間隙率の影響を受けていると考えられる。したがって、間隙率が大きい場合は、岩石表層だ けでなく岩石深部で発生したラドンもフラックスの値に影響していることを示している。幌延泥岩(コ ア試料)の側面をブチルゴムで覆い側面からのラドンの発生を抑え、コア上下端面のみから発生する ようにした場合、軸方向で 7cm の深さまでで発生したラドンがコア端面まで到達してフラックスとし て影響を与えていることが明らかとなった。この結果は、堆積岩などの間隙率の大きい岩石のラドン フラックスを評価する際は、ラドン発生深度を考慮する必要があることを示している。我が国に多く 分布する堆積性軟岩は間隙率が相対的に高く、これらの岩石のラドンフラックスの測定を可能とする ように、手法を改良することが今後の課題である。

次に、我が国の結晶質岩での適用性を確認するため、原位置でのラドン濃度計測による割れ目の評価を予備的に実施した。JAEA 瑞浪超深地層研究所の深度 300m ボーリング横坑のボーリン孔に設置した間隙水圧モニタリング装置の複数区間から採取した水の溶存ラドン濃度を計測するとともに、ボーリングコアを用いたラドンフラックスの測定により、割れ目の間隙幅を推定した。その結果、いずれの区間においても、10⁻² cm オーダーの割れ目幅が得られた。これは、各区間の溶存ラドン濃度に差がないことに加え、同一の岩石コアからのラドンフラックス値で評価しているためである。実際にはラドンフラックスは岩質(変質や構成鉱物)によって異なるため、本試験の際には、割れ目毎のフラックスの違いを考慮して評価するとともに、ボーリング孔内の地下水を循環して採水する予定である。

8.3 割れ目の可視化技術の開発

JAEA 瑞浪超深地層研究所で採取した岩石コアにレジンを注入した試料に対して、医療用 X 線 CT ス

- 8-2 -

キャナ、マイクロフォーカス X線 CT スキャナおよび平面研削と研削面の繰り返し撮影で、コアに注入 したレジンの可視化を試みた。医療用 X線 CT スキャナには X線源の焦点寸法や空間分解能に限界があ り、微細な割れ目を精密に可視化することは困難であるものの、マイクロフォーカス X線 CT スキャナ の撮影前に適用して試料の概要を把握するなどの利用方法が適切と考えられた。マイクロフォーカス X線 CT スキャナの画像は、医療用 X線 CT スキャナに比較して優れた空間分解能が反映され、微細な 割れ目や鉱物脈の分布などを詳細に可視化することができた。しかし、マイクローカス X線 CT スキャ ナ特有のノイズ (アーチファクト)や撮影時のターンテーブルの回転に伴う試料のブレなどもあり、 本来のマイクロフォーカス X線 CT スキャナの性能を活かした3次元可視化画像による詳細な可視化は 実現できなかった。平面研削と研削面の繰り返し撮影で得た画像は、X線 CT 法では識別できない微細 な割れ目の分布の可視化が可能であったが、割れ目面からのレジンの浸潤やレジンからの蛍光剤の分 離などにより、割れ目と基質部との境界の識別が困難であった。撮影時のピント合わせの難しさも識 別を困難にしており、撮影者の技能にも依存せず研削間隔の高精度化も望めるイメージスキャナによ る画像取得が最適であると考えられるので、その適用性の検討を今後の課題とする。

原位置でのレジン注入手法について検討するため、国内外の既往の研究事例を調査・整理した。そ の結果、吐出口付近まで主剤と硬化剤を別々に送り、吐出口先端に装着したスタティックミキサーで 均一に混合して注入する方法が最適であることがわかった。

レジンの選定のために、EP-400MとSS#1の特性を把握する室内試験を実施した。可使時間を計測し たところEP400Mは90分程度、SS#1は76分程度であり、フルオレセインやナフチオンナトリウムな どの蛍光剤を添加しても可視時間はほとんど影響しなかった。また、両レジンともに蛍光剤を添加す ると僅かに粘性が低下する傾向が見られたが、試験時の室温の変化による影響が大きく明確な結論が 得られなかった。レジンは温度環境に敏感であり、恒温室などで実験する必要があることが分かった。 硬化時の水の存在がレジンの硬度や接着強度に与える影響を調査したところ、EP-400MおよびSS#1と もに9日目で最高硬度を発現したが、水分がある場合は僅かに硬度が小さくなる傾向が認められた。 一方、蛍光剤の影響は認められなかった。接着強度は、花崗岩の盤石間の1mmの隙間にレジンを注入 し硬化後に引き剥がす試験により評価した。試験ではレジンが破断することを期待したが、多くのケ ースで岩石の表面が剥がれ、十分なデータが得られなかった。このため、接着強度試験の方法につい て再検討することを今後の課題とする。

実際に原位置で使用する可能性の高い EP-400M について、水平な単一割れ目を想定して数値解析に より浸透特性を評価した。割れ目を一様な開口幅を有する平行平板と仮定した解析では、開口幅の狭 い割れ目ほどレジンの浸潤速度は遅い。注入開始から約 10,000 秒後にはレジンは硬化してしまうため に、それ以降レジンは浸潤しなくなる。注入圧力を高くすれば開口幅の狭い割れ目へ浸潤させること は可能であるが、割れ目に充填物がある場合には充填物を移動させてしまう可能性が生じる。そのた

- 8-3 -

め、原位置試験では、高い注入圧力を避け、複数の孔からレジンを注入することも検討する必要があ る。開口幅が一様でない不均質な割れ目を対象とした浸透解析では、透水性の高い部分を選択してレ ジンが浸潤していく様子が見られた。また、注入点の近傍の透水性が高い不均質場ほど平均的な浸潤 半径が大きい傾向があった。今後は、室内で岩石コアや模擬割れ目に対する浸透試験を行いデータを 蓄積し、原位置での実証試験に繋げたい。

8.4 適用性試験場の地質環境調査

今年度は 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、トレーサー試験装置等の 実施に適した割れ目を検出することを目的として、1本の新規ボーリング孔(14MI49 号孔)の掘削作 業を行った。また、新規のボーリング孔と既存のボーリング孔(13MI37 号孔)の2孔で各種検層、透 水試験、ポイント希釈試験、間隙水圧モニタリング装置の設置・計測を行った。

調査の結果、以下のことが明らかとなった。

- ・ 新規ボーリング孔(14MI49 号孔)で採取したコアは、孔口付近のコンクリートを除き、全 て中粒黒雲母花崗岩(土岐花崗岩)より構成され、石英、長石類および黒雲母を主体とし、 まれに角閃石が認められる。
- ・ 中粒黒雲母花崗岩は弱い変質といくつかの時期の異なる変形作用を被っている。全体的な 変質の特徴としては、母岩全体に長石が白濁化する弱い変質を受け、断層や一部の割れ目の 集中する区間には、長石のセリサイト化、粘土化、緑泥石および、黄鉄鉱、方解石、霰石の 形成が認められる。
- 割れ目充填鉱物は、緑泥石、方解石を主体とし、粘土、黄鉄鉱、霰石が認められる。
- ・ 割目の集中箇所の多くは、NNW 系急傾斜割れ目で構成される。これに比べH(水平〜緩傾斜) 系やNE 系急傾斜割れ目はより離散的である。
- ・ 掘削時の間隙水圧モニタリング結果やコア観察結果、フローメータ・BTV 検層の結果を基 に既存のボーリング孔と水理的な連続性があると考えられた湧水割れ目を対象に水理試験を 実施した。その結果、13MI37 号孔では 3.06×10⁻⁵~1.06×10⁻⁶m²/sec、14MI49 号孔では 3.63 ×10⁻⁵~5.38×10⁻⁸m²/sec の透水量係数が得られた。
- ・ ポイント希釈試験の結果、算出した単位長さあたりの流量は最大で 299mL/min/m、最少で
 4.47 mL/min/m であった。

・ 間隙水圧モニタリングの結果、15mabh以深の間隙水圧は1.57~1.59MPa で安定している。
 平成23年度から実施してきた調査の結果、調査対象地の深度300mボーリング横坑では15mabh以深から湧水を伴う割目が徐々に増えることが確認できた。15mabh以深での透水量係数は10⁻⁶~10⁻⁵m²/sec
 が最も多く、間隙水圧は1.57~1.59MPa で安定している。ただし、孔間での水理的な連続性は確認で

きたが、単一の割れ目は見つかっていない。

深度 300m ボーリング横坑は割れ目の多い上部割れ目帯に位置するが、今後は、比較的割れ目が少な いと想定される深度 500m 地点においても調査対象として検討していきたい。

8.5 原位置トレーサー試験

トレーサー試験技術の適用性試験として、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、ポイント希釈試験と単孔式注水揚水試験、孔間トレーサー試験を実施した。ポイント希釈試 験では、各試験孔でのトレーサーの希釈速度を計測でき、試験対象割れ目のバックグラウンド(自然 状態)の地下水通過流量を推定した。単孔式注水揚水試験と孔間トレーサー試験では、高い回収率は 得られなかったものの、保存性トレーサーだけでなく収着性トレーサーの破過曲線も得ることができ、 後述するように物質移行パラメーターを推定することができた。

トレーサー試験装置に対し平成23年度以降に新たに改良した項目について、今回の試験を通じて原 位置での適用性の確認を行った。

- 5MPa 対応高精度圧力計の使用により圧力計測の精度と分解能が向上し、僅かなポンプの脈動の圧力変化も捉えることが確認できた。
- 試験区間形成用パッカーとナイロンメッシュで形成した試験区間は、透水性に影響を与えることなく試験区間容積を少なくでき、トレーサー溶液を短時間に完全置換する性能を示した。
- ・ 注入切換え用六方バルブによりトレーサーをほぼ矩形波状に注入することが可能となった。
- ・ 高出力光源装置によりウラニン濃度を 0.01ppm まで計測可能となった。ただし、想定した ほどは蛍光強度が上がらず、光ケーブルの接続箇所が多いことによるロスが考えられた。

今年度の適用性試験の結果、新たに顕在化した問題点とその対策について以下に示す。

- ・ 蛍光トレーサーのウラニンとアミノG酸を混合して使用したところ、原液に沈殿が生じる ことが確認された。混合せずに各々で試験するか、希釈後に濃度を計測する必要があると考 える。
- ・ 孔内の蛍光濃度センサーに不具合が生じたが、光ケーブルを傷つけてしまった可能性が高い。作業手順の見直しや光ケーブルの保護について検討が必要と考える。
- ・ 六方バルブの追加によりチューブ類とロッドのクリアランスがほとんどなく、作業効率の
 悪化や漏水等のリスクが高くなっている。内径の大きなロッドを用いる等の対策が必要と考える。
- 光ケーブルの接続箇所が多いことで蛍光強度にロスが発生している可能性がある。光ケーブルの接続箇所を減らす改良が必要と考える。

・ 今回の試験場では孔間が多数の割れ目で水理的に連続しており、孔口パッカーと試験区間
 形成用パッカーだけでは自然状態に近い水圧を保持できなかったと考える。試験精度を保つ
 ためには、パッカーの数を増やす等、トレーサー試験装置の編成について改めて検討する必要がある。

ー方、代表的な試験結果について数値計算による評価解析を行った。単孔式トレーサー試験と孔間 トレーサー試験の保存性トレーサーの破過曲線から、割れ目の開口幅と分散長を同定できたが、両試 験から得られた数値は大きく異なる値であった。この原因は、両試験で評価している割れ目の領域が 異なることもあると考えられるが、単孔式試験の解析で岩石基質への拡散を考慮していないというモ デルの違いも考えられる。今後は、単孔式試験の解析でも岩石基質を考慮したモデルで評価すること としたい。また、バックグラウンドの地下水流れについて、単孔式、孔間いずれのトレーサー試験の 評価でも、ポイント希釈試験で得られた流量よりも大きいものと推定され、ポイント希釈試験の結果 の妥当性を含めて今後検討していきたい。孔間トレーサー試験の収着性トレーサーRb⁺と Ba²⁺の破過曲 線からは、両者の岩石基質に対する分配係数は健岩部を試料とし吸着がほぼ平衡に達した静的な状 態で算出しているが、孔間トレーサー試験では割れ目近傍の岩石基質を対象とし割れ目充填鉱物も見 られ試験時間が短く動的な状態で算出していることが、差異の原因と考えられるが、今後より詳細に 検討していきたい。

8.6 天然のトレーサを利用した調査技術の開発

研究坑道における地下水調査では、JAEAの瑞浪超深地層研究所、幌延深地層研究センターで水質・ 地下水年代調査を実施した。

瑞浪での調査では、研究坑道周辺で採取した地下水のヘリウムの同位体や塩素の同位体は、流出域 の地下水の特徴を有していることを確認した。また、ここ数年は浅層地下水や深層地下水の混合率が 大きく変わっていないことが明らかとなった。研究坑道の掘削に伴う変化を評価するために、地下水 流動・物質移行現解析を実施した。断層や地層の透水係数を変えた感度解析を実施した結果、断層が 水圧や水質や地下水年代の変化を評価するうえで支配的な要因となっていることがわかった。

幌延での調査では、立坑から採取した地下水の³⁶C1 年代と⁴He 年代の評価を行った。その結果、声 問層では、³⁶C1/C1 が平衡に達し、⁴He の蓄積も進んでおり、地下水年代が古い(100 万年以上)と推定 された。一方で、稚内層では、³⁶C1/C1 は声問層と同程度、⁴He は声問層よりも低いものもあった。こ れは、稚内層上部に流動性の高い領域があり、浅層地下水との混合が進んでいるためと考えられた。 また、立坑掘削を対象とした地下水流動解析を実施し、トンネル掘削地点を大気圧解放条件とするこ とで水圧の変化傾向を概ね再現できることが確認できた。 これらの調査結果の妥当性と立坑掘削による変化を確認するために、引き続き調査を継続する。ま た、幌延での既存の調査結果は、ボーリング孔から採取した流動性の高い地下水が対象であったため、 岩石コアでも同様の結果が得られるかを検討する必要がある。今後、地下水流動、水質・地下水年代 の変化に着目した地下水流動・物質移行解析も継続して検討し、現象を再現するために重要な地下水 流動・物質移行現象やそのパラメーターについて検討する。

天然トレーサーの調査では、希ガスサンプラー、速い流れと遅い流れの指標になる物質について調 査した。

希ガスの原位置平衡式サンプラーでは、シリコンチューブを溶存ガスの捕集材料に使うことで、溶 存ガスを現実的な時間で捕集できることを室内試験で確認した。循環式と圧力制御式について、原位 置に適用した結果、循環式のバラツキが小さかった。ただし、各方法の整合性については確認できて いないので、同一試料において比較を行い、各サンプラーの有効性を確認する必要がある。

速い地下水の指標については、トリチウム、無機¹⁴C、有機¹⁴C、⁸⁷Sr/⁸⁶Sr について検討しており、 それぞれ分析精度や用途、その限界等を明らかにするための試験を実施した。トリチウムは測定の障 害となる蛍光染料の除去法を提案した。無機¹⁴C は処理法で値が変わる可能性を示し、年代測定にガ ス化法を適用すべきであることを示した。地下水の混合指標として有機¹⁴C を利用するため、塩濃度 が高い地下水から有機物を分離・精製する方法を検討した。また、⁸⁷Sr/⁸⁶Sr は海水と化石海水の混合 指標としての有用性を検討するため、海水や化石海水から Sr を分離・精製した。遅い地下水の指標に ついては、現在調査を実施している地点での岩石などを用いた拡散試験を実施し、拡散係数と同位体 分別とを求めた。このような基礎データの蓄積を図るとともに、岩石の物性などから同位体分別の予 測方法を検討する。今後、原位置における調査を行い、同位体分別に基づいて拡散による輸送の寄与 率を評価する方法を検討する。