

平成29年度
高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関
する技術開発事業
処分システム工学確証技術開発

報告書
(第2分冊)

処分システム工学確証技術開発 人工バリア品質/
健全性評価手法の構築—緩衝材

平成30年3月

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

本報告書は、経済産業省からの委託研究として、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した、平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 処分システム工学確証技術開発のうち、処分システム工学確証技術開発 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材の開発成果を取りまとめたものです。

報告書の構成

平成29年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 処分システム工学確証技術開発の報告書は、以下の分冊により構成されている。

当該報告書	分冊名	報告書の標題
	第1分冊	処分システム工学確証技術開発 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック
○	第2分冊	処分システム工学確証技術開発 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材
	第3分冊	人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築
	第4分冊	処分システム工学確証技術開発 モニタリング関連技術の整備

目次

第1章	はじめに.....	1-1
1.1	本事業の背景および目的.....	1-1
1.2	本事業の構成および全体計画.....	1-1
1.2.1	研究開発項目の構成.....	1-1
1.2.2	本事業における設定課題と5カ年の計画.....	1-1
1.3	人工バリア品質/健全性評価手法の構築—緩衝材.....	1-4
1.3.1	背景と目的.....	1-4
1.3.2	調査研究のアプローチ.....	1-5
1.3.3	研究計画と実施内容.....	1-7
第2章	緩衝材への地下水浸潤に関わる調査.....	2-1
2.1	緩衝材への地下水浸潤状況の評価.....	2-1
2.1.1	長尺ベントナイト供試体を用いた一次元浸潤速度取得試験（密度一定条件）.....	2-1
2.1.2	長尺ベントナイト供試体を用いた膨潤変形試験.....	2-11
2.1.3	まとめ.....	2-18
2.2	施工特性（密度差）が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響.....	2-19
2.2.1	研究の背景と目的.....	2-19
2.2.2	密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響.....	2-19
2.2.3	応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響.....	2-29
2.2.4	密度均一化に関する力学的な解釈と結果の反映.....	2-40
第3章	再冠水時の緩衝材の変質に関わる検討.....	3-1
3.1	Ca型化が緩衝材に及ぼす影響の検討.....	3-1
3.1.1	試験の目的及び概要.....	3-1
3.1.2	試験方法.....	3-1
3.1.3	試験結果.....	3-4
3.1.4	まとめ.....	3-10
3.2	鉄が緩衝材に及ぼす影響の検討.....	3-12
3.2.1	目的.....	3-12
3.2.2	変質物質に関する分析方法.....	3-13
3.2.3	鉄との接触による変質に関する分析結果.....	3-18
3.3	イオン交換によるベントナイトの変質.....	3-151
3.3.1	試料の前処理.....	3-152
3.3.2	分析結果.....	3-152
第4章	緩衝材の流出に関する検討.....	4-1
4.1	緩衝材流出に関する室内試験.....	4-1
4.1.1	試験の目的および概要.....	4-1
4.1.2	ケイ砂含有率の影響評価.....	4-1

4.1.3	高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験	4-7
4.1.4	亀裂を有する模擬岩盤の流出試験	4-14
4.1.5	総通水量とエロージョン量の関係	4-27
4.1.6	まとめ	4-28
4.2	地下研究施設における緩衝材流出試験	4-29
4.2.1	目的と概要	4-29
4.2.2	湧水量測定	4-33
4.2.3	試験孔3を対象とした水理試験	4-37
4.2.4	緩衝材流出試験（定流量注水試験）	4-48
4.2.5	試験体の回収	4-92
4.2.6	原位置における緩衝材エロージョン量について	4-116
4.2.7	まとめ	4-117
4.3	緩衝材の流出抑制の対策と解析技術への反映	4-118
4.3.1	流出現象に対する工学的対策	4-118
4.3.2	解析技術への反映	4-126
第5章	再冠水時の緩衝材挙動のモデル化・解析に関わる検討	5-1
5.1	湧水量の解析的評価方法の検討	5-1
5.1.1	研究の概要	5-1
5.1.2	周辺坑道の埋戻しが処分孔湧水量に与える影響の評価	5-4
5.1.3	定置後の処分孔周辺の地下水流動の評価	5-71
5.1.4	まとめと今後の課題	5-124
5.2	再冠水時の緩衝材の挙動に関わる力学解析手法の検討	5-125
5.2.1	概要	5-125
5.2.2	圧密特性に関するモデルの高度化	5-126
5.2.3	まとめ	5-141
5.3	緩衝材の浸潤に関する解析手法の適応性の検討	5-142
5.3.1	概要	5-142
5.3.2	対象とした室内試験	5-142
5.3.3	解析方法	5-143
5.3.4	解析結果	5-145
5.3.5	まとめ	5-149
第6章	緩衝材の設計に関する検討	6-1
6.1	緩衝材の設計要件に関する知見の整理	6-1
6.1.1	設計要件に関する整理	6-4
6.1.2	設計方法の検討	6-19
6.1.3	複数材料を考慮した緩衝材の低透水性に関する指標の検討	6-56
6.2	設計に必要なデータに関する検討	6-61
6.2.1	各設計要件に対するデータの充足性	6-61

6.2.2	緩衝材の透水性に関するデータのばらつきと安全裕度	6-63
6.3	課題の整理とまとめ	6-69
第7章	まとめ.....	7-1
7.1	緩衝材の地下水浸潤に係る調査	7-1
7.1.1	緩衝材への地下水浸潤状況の評価	7-1
7.1.2	施工特性（密度差）が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響	7-2
7.2	再冠水時の緩衝材の変質に係る検討.....	7-3
7.2.1	Ca型化が緩衝材に及ぼす影響の検討.....	7-3
7.2.2	鉄による変質挙動の把握.....	7-4
7.3	緩衝材の流出に関する検討.....	7-5
7.3.1	緩衝材の流出に関する室内試験	7-5
7.3.2	地下研究施設における緩衝材流出試験	7-6
7.4	再冠水時の緩衝材挙動のモデル化・解析評価に係る検討	7-7
7.4.1	湧水量の解析的評価方法の検討	7-7
7.4.2	再冠水時の緩衝材の挙動に関わる力学解析手法の検討	7-8
7.4.3	緩衝材の浸潤に関する解析手法の適応性の検討	7-9
7.5	緩衝材の設計に関する検討.....	7-9

図 表 目 次

図 1.3.1-1	緩衝材の時系列の変化のイメージ	1-5
図 1.3.2-1	本業務で対象とした再冠水期間の緩衝材に起こる現象.....	1-7
図 2.1.1-1	一次元浸潤速度取得試験装置の概要.....	2-2
図 2.1.1-2	飽和度と比抵抗の関係（ケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイト）	2-3
図 2.1.1-3	締固め終了後の試験機.....	2-3
図 2.1.1-4	浸潤に伴う飽和度の変化（上：蒸留水、下：NaCl 水溶液（0.5M））	2-5
図 2.1.1-5	浸潤フロントの進展状況（初期飽和度からの増分が 1%で定義）	2-6
図 2.1.1-6	飽和フロントの進展状況（飽和度 95%以上で定義）	2-7
図 2.1.1-7	飽和度の遷移領域.....	2-8
図 2.1.1-8	飽和フロントの進展状況.....	2-8
図 2.1.1-9	供給液の浸潤状況.....	2-9
図 2.1.1-10	液体の浸潤状況（左：蒸留水、右：NaCl 水溶液（0.5M））	2-10
図 2.1.1-11	圧力計と浸潤面の水位差.....	2-10
図 2.1.1-12	軸応力の経時変化.....	2-11
図 2.1.2-1	一次元膨潤変形試験セル.....	2-12
図 2.1.2-2	膨潤変形試験の状況	2-13
図 2.1.2-3	層ごとの厚さの変化	2-14
図 2.1.2-4	供試体密度分布（目視）	2-14
図 2.1.2-5	供試体密度分布（拡大図）	2-15
図 2.1.2-6	比抵抗値から算出した飽和度分布	2-16
図 2.1.2-7	供試体上面の状況.....	2-16
図 2.1.2-8	試験開始前後の供試体上面の状況	2-17
図 2.1.2-9	供試体密度分布.....	2-17
図 2.2.2-1	力学物性（膨潤量）による均質化の判断のイメージ	2-20
図 2.2.2-2	密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験機	2-20
図 2.2.2-3	膨潤量の経時変化(0.5M NaCl 水溶液)	2-22
図 2.2.2-4	膨潤に伴う乾燥密度の経時変化(0.5M NaCl 水溶液).....	2-22
図 2.2.2-5	直列膨潤量試験中の膨潤圧の経時変化(0.5M NaCl)	2-23
図 2.2.2-6	直列膨潤量試験中の給排水量の経時変化(0.5M NaCl).....	2-24
図 2.2.2-7	供試体模式図	2-24
図 2.2.2-8	膨潤量に対する個々の供試体の乾燥密度と平均乾燥密度の変化.....	2-25
図 2.2.2-9	供試体スライサー	2-26
図 2.2.2-10	直列膨潤量試験の乾燥密度分布	2-27
図 2.2.2-11	直列膨潤量試験の乾燥密度分布	2-28
図 2.2.2-12	直列膨潤量試験の乾燥密度分布	2-29

図 2.2.3-1	応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験の詳細図	2-31
図 2.2.3-2	応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験の供試体調整手順	2-32
図 2.2.3-3	密度分布、及び膨潤量試験のイメージ	2-32
図 2.2.3-4	膨潤に伴う乾燥密度の経時変化に応力履歴が及ぼす影響	2-33
図 2.2.3-5	応力履歴が膨潤挙動に及ぼす影響評価（膨潤圧の経時変化）	2-34
図 2.2.3-6	応力履歴の影響評価のための直列膨潤量試験の乾燥密度分布	2-35
図 2.2.3-7	直列膨潤量試験の乾燥密度の経時変化（0.5M NaCl ケース）	2-36
図 2.2.3-8	直列膨潤量試験の乾燥密度分布	2-37
図 2.2.3-9	正規圧密供試体の膨潤量試験後の乾燥密度分布	2-38
図 2.2.3-10	過圧密供試体の膨潤量試験後の乾燥密度分布	2-40
図 2.2.4-1	残留密度分布の力学的解釈(Case1)	2-41
図 2.2.4-2	残留密度分布の力学的解釈(Case2)	2-42
図 2.2.4-3	残留密度分布の力学的解釈(Case3)	2-42
図 2.2.4-4	応力履歴による密度差の発生に関する力学的解釈（右図：拡大図）	2-43
図 2.2.4-5	施工特性が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響試験の	2-44
図 2.2.4-6	JAEA DATABASE[5]に対する Kozeny-Carman 則のフィッティング結果	2-45
図 2.2.4-7	Kozeny-Carman 則を用いた残留密度差と透水係数の関係	2-46
図 2.2.4-8	膨潤圧試験のイメージ	2-46
図 2.2.4-9	膨潤圧試験開始直後のイメージ	2-47
図 2.2.4-10	高・低飽和度供試体の膨潤圧試験のイメージ	2-47
図 2.2.4-11	膨潤性鉱物の水分特性曲線のイメージ	2-49
図 3.1.2-1	Ca 型化が圧縮ベントナイトの力学挙動に及ぼす影響試験の詳細図	3-3
図 3.1.2-2	Ca 型化が圧縮ベントナイトの力学挙動に及ぼす影響のイメージ	3-3
図 3.1.3-1	膨潤圧と通水圧の経時変化	3-4
図 3.1.3-2	通水量と通水圧の経時変化	3-5
図 3.1.3-3	排水中の各種イオン濃度の経時変化	3-8
図 3.1.3-4	排水中の Na イオンと Ca イオン濃度の関係	3-9
図 3.1.3-5	排水中の Na イオンから算出した Ca 型化率の経時変化	3-10
図 3.1.3-6	排水の質量から算出した透水係数の経時変化	3-10
図 3.2.2-1	最大送水圧と給水期間の関係	3-14
図 3.2.2-2	ブロックサンプリングによる変質部の採取	3-15
図 3.2.2-3	採取した鋼製モールドと接触した試料	3-15
図 3.2.2-4	XRD 分析の対象部位	3-17
図 3.2.3-1	通水試験試料 Case1 の炭素鋼接触界面近傍の X 線 CT 測定結果	3-19
図 3.2.3-2	通水試験試料 Case2 の炭素鋼接触界面近傍の X 線 CT 測定結果	3-19
図 3.2.3-3	改良型破過圧試験装置イメージ	3-21
図 3.2.3-4	破過に対する飽和度の影響のイメージ	3-21
図 3.2.3-5	一次元排気圧縮過程	3-23

図 3.2.3-6	吸水膨潤過程	3-23
図 3.2.3-7	破過試験における通水圧と膨潤圧の経時変化	3-24
図 3.2.3-8	通水圧と膨潤圧の関係.....	3-24
図 3.2.3-9	破過試験における通水圧と有効膨潤圧の経時変化.....	3-25
図 3.2.3-10	通水圧と有効膨潤圧の関係	3-25
図 3.2.3-11	通水圧の上昇速度が膨潤圧の経時変化に及ぼす影響 (NaB16)	3-27
図 3.2.3-12	通水圧の上昇速度が膨潤圧の経時変化に及ぼす影響 (NaB12)	3-27
図 3.2.3-13	通水圧の上昇速度が膨潤圧の経時変化に及ぼす影響 (CaB16)	3-27
図 3.2.3-14	一次元排気圧縮過程の乾燥密度と圧縮応力の関係.....	3-29
図 3.2.3-15	給水時の軸応力の変化.....	3-30
図 3.2.3-16	給水圧と軸応力の経時変化	3-31
図 3.2.3-17	不飽和供試体の破過前後の状況観察結果	3-32
図 3.2.3-18	飽和供試体と不飽和供試体の破過時の水圧の比較.....	3-33
図 3.2.3-19	長期浸漬試験試料の回収時の様子	3-34
図 3.2.3-20	分析に用いたベントナイト(a: MB4; b: TB6)	3-35
図 3.2.3-21	実験溶液の Eh-pH ダイアグラム (相境界は Fe-Si-O-H@80°Cに基づく) ..	3-36
図 3.2.3-22	溶接手法と微量元素の溶脱量の関係.....	3-38
図 3.2.3-23	溶液の Eh に対する金属元素および SO ₄ と TOC の関係.....	3-38
図 3.2.3-24	溶液の Al vs. Si プロット.....	3-39
図 3.2.3-25	炭素鋼の水素放出曲線(a: MB4; b: TB6).....	3-40
図 3.2.3-26	炭素鋼試験片の EPMA マッピング結果 (ASW10-MB4、12x36 mm ²) ...	3-42
図 3.2.3-27	炭素鋼試験片の EPMA マッピング結果 (AFW10-TB6)	3-43
図 3.2.3-28	ベントナイトのマッピング分析に用いた試料の調整(a: MB4; b: TB6)	3-44
図 3.2.3-29	炭素鋼接触ベントナイトの EPMA マッピング結果 (ASW10_MB4)	3-45
図 3.2.3-30	炭素鋼接触ベントナイトの EPMA マッピング結果 (AFW10_TB6)	3-46
図 3.2.3-31	炭素鋼接触ベントナイトの Fe 強度プロファイルの比較(a: ASW10_MB4; b: AFW10_TB6)	3-47
図 3.2.3-32	長期浸漬試験試料のベントナイトのスメクタイト Fe プロファイル.....	3-47
図 3.2.3-33	海水系試験で用いた炭素鋼(MB4)の FESEM-EDS 分析.....	3-49
図 3.2.3-34	淡水系試験でも用いた炭素鋼(TB6)の FESEM-EDS 分析.....	3-49
図 3.2.3-35	上位の粘土層の FESEM-EDS 分析.....	3-50
図 3.2.3-36	炭素鋼から上位の変質層の FESEM-EDS 分析.....	3-51
図 3.2.3-37	炭素鋼から上位の変質層の FESEM-EDS 分析 (その 2)	3-52
図 3.2.3-38	鉄オリビン組成の変質相から鉄蛇紋石までの産状.....	3-53
図 3.2.3-39	水酸化鉄近傍の鉄緑泥石の FESEM-EDS 分析 (その 2)	3-54
図 3.2.3-40	水酸化鉄と共存するシリカ	3-54
図 3.2.3-41	結晶性の良い鉄蛇紋石から鉄サポナイトの産状.....	3-55
図 3.2.3-42	炭素鋼離溶組織部の変質相の FESEM-EDS 分析	3-56

図 3.2.3-43	ガラス質フェロシライトと共存する金属鉄とシデライト質沈殿相	3-57
図 3.2.3-44	炭素鋼上の Fe-S ガラス質被膜	3-57
図 3.2.3-45	ガラス質フェロシライト上のノントロナイト質スメクタイト.....	3-58
図 3.2.3-46	ガラス質フェロシライト上のシリカと鉄サポナイト沈殿物	3-59
図 3.2.3-47	アルバイト、シリカ、鉄サポナイト沈殿物.....	3-59
図 3.2.3-48	サポナイト質の非晶質沈殿物.....	3-60
図 3.2.3-49	金属鉄上に共存するガラス質フェロシライト—磁鉄鉱.....	3-60
図 3.2.3-50	共存するウスタイト—磁鉄鉱—ファイヤライト	3-61
図 3.2.3-51	ウスタイト上のフェロシライト質ガラスと鉄サポナイト	3-61
図 3.2.3-52	MB4-A 試料 (炭素鋼近傍) の XRD リートベルト解析結果	3-62
図 3.2.3-53	TB6-A 試料 (炭素鋼近傍) の XRD リートベルト解析結果	3-63
図 3.2.3-54	炭素鋼接触ベントナイトの界面試料のマイクロ XRD 分析(Gp: gypsum; F: fayalite; M: montmorillonite; C: calcite; G: goethite; Q: quartz, S: saponite; Ch: chamosite;	3-64
図 3.2.3-55	相対湿度と陽イオン交換後モンモリロナイトの d ₀₀₁ 距離の関係	3-65
図 3.2.3-56	MB4 試料のベントナイトの湿潤制御 XRD 測定.....	3-65
図 3.2.3-57	TB6 試料のベントナイトの湿潤制御 XRD 測定.....	3-65
図 3.2.3-58	海水系と淡水系における反応時間と d ₀₀₁ 距離の関係.....	3-67
図 3.2.3-59	MB4 試料のラマン分光分析結果.....	3-68
図 3.2.3-60	TB6 試料のラマン分光分析結果.....	3-68
図 3.2.3-61	変質相を伴うモンモリロナイト粒子(MB4、その 1)	3-69
図 3.2.3-62	MB4 試料 (領域 1) の SAED パターンと EDS スペクトル	3-70
図 3.2.3-63	MB4 試料 (領域 1 下部) のスメクタイトとその SAED パターンと EDS スペクトル.....	3-70
図 3.2.3-64	シリカを伴うモンモリロナイト(MB4)	3-71
図 3.2.3-65	粒子 2-1 および 2-2 のトリディマイトと磁鉄鉱を示す SAED パターン	3-71
図 3.2.3-66	変質相を伴うモンモリロナイト粒子(MB4、その 2)	3-72
図 3.2.3-67	視野 1 の SAED パターンと EDS データ.....	3-72
図 3.2.3-68	視野 2 の SAED パターンと EDS データ	3-73
図 3.2.3-69	TB6 試料の TEM 観察.....	3-73
図 3.2.3-70	TB6 試料の TEM 観察(視野 1)	3-74
図 3.2.3-71	TB6 試料の EDS 分析(視野 1).....	3-75
図 3.2.3-72	TB6 試料の TEM 観察(視野 2)	3-75
図 3.2.3-73	TB6 試料の STEM 観察(視野 2).....	3-76
図 3.2.3-74	TB6 試料の TEM 観察(視野 3)	3-76
図 3.2.3-75	TB6 試料の STEM 観察(視野 3).....	3-76
図 3.2.3-76	ベントナイト中の炭素鋼 ASW10-MB 試験片のナノ XCT 画像.....	3-77
図 3.2.3-77	ベントナイト中の炭素鋼 AFW10-MB 試験片のナノ XCT 画像.....	3-78

図 3.2.3-78	E621(ASW10)試料の TEM 観察.....	3-79
図 3.2.3-79	E621(ASW10)試料の EDS 測定.....	3-79
図 3.2.3-80	E621(ASW10)試料の STEM 測定.....	3-80
図 3.2.3-81	ASW5(TB6702)炭素鋼試料の腐食断面の元素マッピング	3-80
図 3.2.3-82	ASW5(EB6702)炭素鋼試料の腐食断面の元素マッピング	3-81
図 3.2.3-83	ASW10(TB6613)炭素鋼試料の腐食断面の元素マッピング	3-81
図 3.2.3-84	ASW10(EB612)炭素鋼試料の腐食断面の元素マッピング	3-82
図 3.2.3-85	AFW5(TB6703)炭素鋼試料の腐食断面の元素マッピング	3-82
図 3.2.3-86	AFW5(EB6705)炭素鋼試料の腐食断面の元素マッピング	3-83
図 3.2.3-87	AFW10(TB6619)炭素鋼試料の腐食断面の元素マッピング	3-83
図 3.2.3-88	AFW10(EB618)炭素鋼試料の腐食断面の元素マッピング	3-84
図 3.2.3-89	ASW5_TB6702 試料の EPMA マッピング観察(O and S)	3-84
図 3.2.3-90	ASW10_TB6613 試料の EPMA マッピング観察(O and S)	3-85
図 3.2.3-91	海水系浸漬試料の炭素鋼 TB6613(ASW10)の EPMA ビームスキャンマッピング	3-86
図 3.2.3-92	海水系浸漬試料の炭素鋼 EB618(AFW10)の EPMA ビームスキャンマッピング	3-87
図 3.2.3-93	海水系の炭素鋼腐食界面のケイ酸塩層の微細組織(BEI, 200x200 μm^2).....	3-88
図 3.2.3-94	淡水系の炭素鋼腐食界面のケイ酸塩層の微細組織(BEI, 200x200 μm^2).....	3-89
図 3.2.3-95	海水系炭素鋼の被覆層のスポット分析	3-90
図 3.2.3-96	淡水系炭素鋼の被覆層のスポット分析	3-90
図 3.2.3-97	ASW5_E605 試料の界面スクレイブ試料(greenalite).....	3-93
図 3.2.3-98	ASW5_E605 試料の界面スクレイブ試料(ferrosilite)	3-93
図 3.2.3-99	ASW5_E605 試料の界面スクレイブ試料(wustite)	3-94
図 3.2.3-100	ASW5_E605 試料の界面スクレイブ試料($\text{Fe}(\text{OH})_2$).....	3-94
図 3.2.3-101	ASW5_E605 試料の界面スクレイブ試料(ferrosilite)	3-95
図 3.2.3-102	ASW5_E605 試料の界面スクレイブ試料(FeO).....	3-95
図 3.2.3-103	ASW5_E605 試料の界面スクレイブ試料(FeO).....	3-96
図 3.2.3-104	ASW5_E605 試料の界面スクレイブ試料(greenalite).....	3-96
図 3.2.3-105	ASW5_E605 試料の界面スクレイブ試料(greenalite).....	3-97
図 3.2.3-106	ASW5_E605 試料の界面スクレイブ試料(ferrosilite)	3-97
図 3.2.3-107	ASW5_E605 試料の界面スクレイブ試料(wustite)	3-98
図 3.2.3-108	ASW5_E605 試料の界面スクレイブ試料($\text{Fe}(\text{OH})_2$).....	3-98
図 3.2.3-109	ASW5_E605 試料の界面スクレイブ試料(wustite)	3-99
図 3.2.3-110	ASW5_E605 試料の界面スクレイブ試料(Fe metal)	3-99
図 3.2.3-111	ASW5_E605 試料の界面スクレイブ試料(ferrosilite).....	3-100
図 3.2.3-112	幌延腐食試験後に回収された緩衝材（真空パック保管）	3-101
図 3.2.3-113	幌延炭素鋼接触ベントナイトの EPMA 分析試料の概観.....	3-102

図 3.2.3-114	HRB-1 試料の EPMA 元素マップ	3-103
図 3.2.3-115	HRB-2 試料の EPMA 元素マップ	3-105
図 3.2.3-116	HRB-2 試料の EPMA 元素マップ	3-107
図 3.2.3-117	スメクタイトの Fe 含有量プロファイル(Fe apfu)	3-108
図 3.2.3-118	鉄粘土鉱物標本における FESEM-EDS 分析結果	3-109
図 3.2.3-119	幌延腐食試験のヒーターパイプ最表面の腐食生成物(HRB-0)	3-110
図 3.2.3-120	幌延腐食試験のヒーターパイプ表面の結晶質腐食生成物(HRB-0)	3-110
図 3.2.3-121	幌延腐食試験のヒーターパイプ表面の炭酸塩鉱物(HRB-0)	3-111
図 3.2.3-122	幌延腐食試験のヒーターパイプ表面の結晶質腐食生成物(HRB-0)	3-111
図 3.2.3-123	幌延腐食試験のヒーターパイプ表面の蛇紋石質腐食生成物(HRB-0)	3-111
図 3.2.3-124	HRB-1 接触界面試料(0 mm)の FESEM-EDS 分析結果	3-112
図 3.2.3-125	HRB-1 接触界面試料(0 mm)の FESEM-EDS 分析結果(その 2)	3-113
図 3.2.3-126	HRB-1 接触界面遠方試料(25 mm)の FESEM-EDS 分析結果	3-114
図 3.2.3-127	HRB-2 接触界面試料の FESEM-EDS 分析結果	3-114
図 3.2.3-128	HRB-3 接触界面試料の FESEM-EDS 分析結果	3-115
図 3.2.3-129	幌延ベントナイト試験試料の Fe 含有量のプロファイル	3-116
図 3.2.3-130	HRB-1 試料の XRD リートベルト解析	3-117
図 3.2.3-131	XRD-Rietveld 解析結果 (界面近傍試料)	3-118
図 3.2.3-132	XRD-Rietveld 解析結果 (シリカ砂試料)	3-119
図 3.2.3-133	幌延炭素鋼接触ベントナイトの構成鉱物組成変化	3-120
図 3.2.3-134	幌延腐食試験の緩衝材界面試料のマイクロ XRD パターン	3-121
図 3.2.3-135	幌延ベントナイト試験試料の CEC(a)と層間 Fe ²⁺ (b)のプロファイル	3-122
図 3.2.3-136	室内腐食試験試料の回収	3-125
図 3.2.3-137	XRD 分析試料の概観(a: IH-A; b: IH-E)	3-126
図 3.2.3-138	IH-A 試料の元素マッピング結果	3-127
図 3.2.3-139	IH-D 試料の元素マッピング結果	3-129
図 3.2.3-140	IH 室内試験試料のスメクタイトの Fe プロファイル(apfu)	3-130
図 3.2.3-141	Fe 酸化物の産状	3-131
図 3.2.3-142	複数の微粒子状 Fe 酸化物の産状	3-131
図 3.2.3-143	多様な Fe 変質鉱物と NaCl	3-132
図 3.2.3-144	未変質のままのモンモリロナイト	3-132
図 3.2.3-145	Fe 酸化物と金属鉄	3-133
図 3.2.3-146	FeO の微結晶	3-134
図 3.2.3-147	NaCl と共存する FeO	3-134
図 3.2.3-148	金属鉄とその上に成長する微細な FeO と Fe を含む石膏	3-135
図 3.2.3-149	FeO と共存する NaCl	3-136
図 3.2.3-150	FeO の微結晶	3-136
図 3.2.3-151	微細な FeO と共存するノントロナイト	3-137

図 3.2.3-152	SiO ₂ と共存するクリノプチロライト質ゼオライト	3-137
図 3.2.3-153	未変質のままのモンモリロナイト	3-138
図 3.2.3-154	ノントロナイトと Fe を含むカルサイト	3-138
図 3.2.3-155	Fe を含む石膏の産状	3-139
図 3.2.3-156	ノントロナイトの産状	3-139
図 3.2.3-157	未変質のままのモンモリロナイトと随伴鉱物のアルバイト	3-140
図 3.2.3-158	モンモリロナイトの随伴鉱物のシリカ	3-140
図 3.2.3-159	初期ベントナイトブロック試料	3-141
図 3.2.3-160	IH 試験の出発ベントナイト試料の XRD パターン	3-142
図 3.2.3-161	IH-A-1 試料の XRD パターン	3-142
図 3.2.3-162	IH-A-2 試料の XRD パターン	3-143
図 3.2.3-163	IH-E-1 試料の XRD パターン	3-143
図 3.2.3-164	IH-E-2 試料の XRD パターン	3-144
図 3.2.3-165	IH-A-1 試料 (炭素鋼腐食界面) の XRD リートベルト解析	3-145
図 3.2.3-166	IH-A-2 試料 (炭素鋼腐食界面接触ベントナイト) の XRD リートベルト解析	3-145
図 3.2.3-167	IH-E-1 試料(上位炭素鋼接触ベントナイト)の XRD リートベルト解析 ...	3-146
図 3.2.3-168	IH-E-2 試料(上位炭素鋼接触ベントナイト、内側)の XRD リートベルト解析	3-146
図 3.2.3-169	室内腐食試験の緩衝材界面試料のマイクロ XRD パターン	3-148
図 3.2.3-170	炭素鋼の変質モデルとベントナイト接触炭素鋼界面の断面微細観察	3-150
図 3.3.1-1	ブロック試料の浸漬の様子 (各溶液はイオン強度 : 0.5M)	3-152
図 3.3.2-1	NaCl 浸漬-(1)	3-153
図 3.3.2-2	NaCl 浸漬-(2)	3-153
図 3.3.2-3	流出試験 (KCl 浸漬) -(1)	3-154
図 3.3.2-4	流出試験 (KCl 浸漬) -(2)	3-155
図 3.3.2-5	流出試験 (KCl 浸漬) -(3)	3-155
図 3.3.2-6	流出試験 (CaCl ₂ 浸漬) -(1)	3-156
図 3.3.2-7	流出試験 (CaCl ₂ 浸漬) -(2)	3-156
図 3.3.2-8	流出試験 (CaCl ₂ 浸漬) -(3)	3-157
図 3.3.2-9	流出試験 (MgCl ₂ 浸漬) -(1)	3-158
図 3.3.2-10	流出試験 (MgCl ₂ 浸漬) -(2)	3-158
図 3.3.2-11	流出試験ベントナイトの交換性陽イオン組成(meq/100g の割合)	3-161
図 3.3.2-12	モンモリロナイト(mont)の層間陽イオン総数と交換性陽イオン組成(a)、および 間隙水(pw)との Na に対するイオン交換分配係数(b)	3-163
図 3.3.2-13	交換性陽イオン組成_解析結果_Kd-実験より求めた値 (meq/100g の割合) .3- 167	
図 3.3.2-14	交換性陽イオン組成_解析結果_Kd-TRU2[3] (meq/100g の割合)	3-168

図 3.3.2-15	イオン交換ベントナイト試料の XRD 測定(a: 定方位測定 ; b: EG 処理測定).	3-169
図 3.3.2-16	NaCl 浸漬試料の XRD リートベルト解析	3-170
図 3.3.2-17	KCl 浸漬試料の XRD リートベルト解析	3-170
図 3.3.2-18	CaCl ₂ 浸漬試料の XRD リートベルト解析	3-171
図 3.3.2-19	MgCl ₂ 浸漬試料の XRD リートベルト解析	3-171
図 4.1.2-1	アクリル製緩衝材流出試験セル	4-2
図 4.1.2-2	エロージョン現象に対するケイ砂含有率の影響検討試験の試験前供試体	4-4
図 4.1.2-3	エロージョン現象に対するケイ砂含有率の影響検討試験の試験後供試体	4-4
図 4.1.2-4	エロージョン現象に対するケイ砂含有率の影響検討試験中の供試体の経時変化	4-5
図 4.1.2-5	通水圧と通水量の経時変化	4-6
図 4.1.2-6	総通水量とエロージョン質量の関係に対するケイ砂含有率の影響	4-7
図 4.1.3-1	2重セルを用いた高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験イメージ	4-8
図 4.1.3-2	2重セルを用いた高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験装置	4-9
図 4.1.3-3	多孔質板の設置状況	4-9
図 4.1.3-4	試験条件の設定のための通水試験	4-9
図 4.1.3-5	高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験用供試体作製フロー	4-10
図 4.1.3-6	高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験供試体	4-11
図 4.1.3-7	高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験計測装置	4-11
図 4.1.3-8	高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験状況	4-12
図 4.1.3-9	通水圧と総通水量の経時変化	4-13
図 4.1.3-10	通水量と湧水量の経時変化	4-13
図 4.1.3-11	通水量と膨潤圧の経時変化	4-14
図 4.1.3-12	高水圧低流量下における総通水量とエロージョン質量の関係	4-14
図 4.1.4-1	隙間を有するアクリル製流出試験セルのイメージ	4-15
図 4.1.4-2	隙間を有するアクリル製流出試験セルの流路形状イメージ	4-16
図 4.1.4-3	予察試験結果	4-17
図 4.1.4-4	既往の研究で用いた浸入試験装置	4-18
図 4.1.4-5	通水圧と総通水量の関係	4-18
図 4.1.4-6	模擬亀裂内のエロージョン状況観察結果 (平面ケース)	4-19
図 4.1.4-7	堆積距離と浸入距離の定義	4-20
図 4.1.4-8	堆積距離と浸入距離の経時変化	4-20
図 4.1.4-9	堆積距離と浸入距離における流速の経時変化	4-21
図 4.1.4-10	解体時の供試体写真 (供試体は下側が上部)	4-21
図 4.1.4-11	通水圧と通総水量の関係	4-22
図 4.1.4-12	模擬亀裂内のエロージョン状況観察結果 (直線ケース)	4-23
図 4.1.4-13	解体時の供試体写真 (供試体は下側が上部)	4-24

図 4.1.4-14	通水圧と通水量の関係.....	4-24
図 4.1.4-15	模擬亀裂内のエロージョン状況観察結果（平面ケース）	4-26
図 4.1.4-16	堆積距離の定義.....	4-26
図 4.1.4-17	堆積距離の経時変化	4-26
図 4.1.4-18	解体時の供試体写真	4-27
図 4.1.5-1	総通水量とエロージョン質量の関係.....	4-28
図 4.2.1-1	本業務の流れ	4-31
図 4.2.1-2	試験坑道 5.....	4-32
図 4.2.2-1	水位計（S&DL mini およびバロメータ）	4-33
図 4.2.2-2	試験孔 3 の水位の経時変化（ケース 1, 3）	4-35
図 4.2.2-3	試験孔 2 の水位の経時変化（ケース 2）	4-36
図 4.2.2-4	試験孔 3 の湧水量と水位の相関（移動平均）	4-36
図 4.2.2-5	試験孔 2 の湧水量と水位の相関（移動平均）	4-37
図 4.2.3-1	水理試験状況（止水プラグ設置状況）	4-38
図 4.2.3-2	水理試験区間および試験装置.....	4-38
図 4.2.3-3	水理試験（定流量試験）の概念図	4-39
図 4.2.3-4	水理試験結果 試験孔水位（水頭）と注水流量の経時変化（ケース 1）	4-41
図 4.2.3-5	水理試験結果 試験孔水位（水頭）と注水流量の経時変化（ケース 2）	4-41
図 4.2.3-6	水理試験結果 試験孔水位（水頭）と注水流量の経時変化（ケース 3）	4-42
図 4.2.3-7	水理試験結果 試験孔水位（水頭）と注水流量の経時変化（ケース 4）	4-42
図 4.2.3-8	水理試験結果 試験孔水位（水頭）と注水流量の相関.....	4-43
図 4.2.3-9	水理試験結果（緩衝材流出試験実施前）	4-44
図 4.2.3-10	水理試験結果 試験孔水位（水頭）と注水流量の経時変化（ケース 3'） ..	4-45
図 4.2.3-11	水理試験結果 試験孔水位（水頭）と注水流量の経時変化（ケース 4'） ..	4-46
図 4.2.3-12	水理試験結果 試験孔水位（水頭）と注水流量の相関（全ケース）	4-46
図 4.2.3-13	水理試験結果（緩衝材流出試験実施前と実施後）	4-48
図 4.2.4-1	注水試験装置	4-49
図 4.2.4-2	注水区間のパッカー、圧力計（水位計）組立状況.....	4-52
図 4.2.4-3	注水区間のパッカー、圧力計（水位計）設置完了の状況.....	4-52
図 4.2.4-4	注水孔内のパッカー設置位置.....	4-53
図 4.2.4-5	試験体の組立状況	4-54
図 4.2.4-6	試験体の組立状況	4-54
図 4.2.4-7	試験体の組立状況	4-54
図 4.2.4-8	緩衝材ブロックの形状.....	4-55
図 4.2.4-9	定置治具の仕様.....	4-56
図 4.2.4-10	緩衝材ブロック間の中蓋側部へのマーキング状況.....	4-57
図 4.2.4-11	緩衝材ブロック間の境界の一部に油性マーカによるマーキング状況.....	4-57
図 4.2.4-12	上蓋・中蓋間のデッドスペースへのゴム設置状況.....	4-58

図 4.2.4-13	土圧計設置位置.....	4-58
図 4.2.4-14	緩衝材ブロックの内部に埋めた上下の土圧計の設置位置.....	4-59
図 4.2.4-15	緩衝材ブロック溝加工状況.....	4-59
図 4.2.4-16	土圧計設置状況.....	4-59
図 4.2.4-17	側部土圧計設置位置 説明図.....	4-60
図 4.2.4-18	保護管に通した側部土圧計.....	4-60
図 4.2.4-19	側部土圧計の設置状況.....	4-60
図 4.2.4-20	試験体と孔壁間の止水施工の概念図.....	4-61
図 4.2.4-21	自動採水装置 マグネットポンプ.....	4-62
図 4.2.4-22	自動採水装置 電磁バルブ.....	4-62
図 4.2.4-23	自動採水装置 タイマー.....	4-63
図 4.2.4-24	分光光度計 UVmini-1240.....	4-64
図 4.2.4-25	吸光度分析 検量線.....	4-66
図 4.2.4-26	緩衝材流出試験フロー.....	4-67
図 4.2.4-27	予備定流量注水試験方法 説明図.....	4-68
図 4.2.4-28	注水試験装置.....	4-68
図 4.2.4-29	緩衝材の膨潤圧測定時の試験装置.....	4-69
図 4.2.4-30	緩衝材の膨潤圧（土圧）測定結果.....	4-70
図 4.2.4-31	採水ホース内の水位状況（手計り状況）.....	4-70
図 4.2.4-32	予備注水試験結果（1/2）.....	4-72
図 4.2.4-33	予備注水試験結果（2/2）.....	4-72
図 4.2.4-34	注水試験結果（1回目）（1/2）.....	4-73
図 4.2.4-35	注水試験結果（1回目）（2/2）.....	4-74
図 4.2.4-36	注水試験時の CCD カメラ設置位置（試験孔上部）.....	4-75
図 4.2.4-37	注水孔の地上部配管チューブ先端までの色水到達.....	4-76
図 4.2.4-38	注水試験（1回目）の CCD カメラによる色水の観察（試験孔上部を撮影）	4-77
図 4.2.4-39	注水試験結果（2回目、注水流量上昇時）.....	4-78
図 4.2.4-40	注水試験結果（2回目、注水流量上昇時）.....	4-79
図 4.2.4-41	注水試験結果（2回目、全体）・注水圧力.....	4-80
図 4.2.4-42	注水試験結果（2回目、全体）・水圧とベントナイト濃度.....	4-80
図 4.2.4-43	注水試験結果（2回目、全体）・水圧と土圧.....	4-81
図 4.2.4-44	注水試験（2回目）の CCD カメラによる色水の観察.....	4-83
図 4.2.4-45	注水試験時の CCD カメラ設置位置（注水孔先端部）.....	4-84
図 4.2.4-46	注水試験（2回目）の CCD カメラによる色水の観察.....	4-84
図 4.2.4-47	注水試験（2回目）の CCD カメラによる色水の観察（2回目）.....	4-86
図 4.2.4-48	注水試験（2回目）の CCD カメラによる色水の観察（2回目）.....	4-87
図 4.2.4-49	注水位置.....	4-88

図 4.2.4-50	注水試験結果（3回目、注水流量上昇時）（1/3）	4-88
図 4.2.4-51	注水試験結果（3回目、注水流量上昇時）（2/3）	4-89
図 4.2.4-52	注水試験結果（3回目、全体）（3/3）	4-89
図 4.2.4-53	膨潤圧測定期間中の採水試料の吸光度分析結果（1/2）	4-91
図 4.2.4-54	膨潤圧測定期間中の採水試料の吸光度分析結果（2/2）	4-91
図 4.2.4-55	膨潤圧測定時の採水に関する説明図	4-92
図 4.2.4-56	採水	4-92
図 4.2.5-1	回収直前の試験孔 3 の状況	4-93
図 4.2.5-2	試験体回収時の緩衝材の外観（東面：注水孔側の面）	4-94
図 4.2.5-3	試験体回収時の緩衝材の外観（北面）	4-94
図 4.2.5-4	試験体回収時の緩衝材の外観（西面）	4-95
図 4.2.5-5	試験体回収時の緩衝材の外観（南面：側部土圧計設置側の面）	4-95
図 4.2.5-6	緩衝材の色水跡状況（東面：注水孔側）	4-96
図 4.2.5-7	緩衝材の色水跡状況（色水跡部、東面：注水孔側）	4-96
図 4.2.5-8	緩衝材の色水跡状況（色水跡部、東面：注水孔側）	4-97
図 4.2.5-9	緩衝材の色水跡状況（色水跡部、東面：注水孔側）	4-97
図 4.2.5-10	試験孔壁面写真（北側） 写真の方位：西（左）←北（正面）→東（右）	4-98
図 4.2.5-11	試験孔壁面写真（東側） 写真の方位：北（左）←東（正面）→南（右）	4-99
図 4.2.5-12	試験孔壁面写真（南側） 写真の方位：東（左）←南（正面）→西（右）	4-100
図 4.2.5-13	試験孔壁面写真（西側） 写真の方位：南（左）←西（正面）→北（右）	4-101
図 4.2.5-14	試験孔壁面写真（試験体設置前）	4-102
図 4.2.5-15	試験孔壁面写真（試験体回収直後）	4-103
図 4.2.5-16	試験孔壁面写真（試験体回収後の水理試験後）	4-104
図 4.2.5-17	試験体回収後の膨潤量測定（C 段）	4-106
図 4.2.5-18	試験体回収後の膨潤量測定（D 段）	4-107
図 4.2.5-19	試験体回収後の膨潤量測定（F 段）	4-108
図 4.2.5-20	緩衝材の解体状況	4-109
図 4.2.5-21	サンプリング試料の採取状況	4-109
図 4.2.5-22	緩衝材ブロックのナンバリング 説明図	4-110
図 4.2.5-23	試験体の試験孔内設置時の隙間 説明図	4-112
図 4.2.5-24	緩衝材ブロック（F 段、上から 6 段目）の最外周部の含水比試験結果	4-113
図 4.2.5-25	各段における緩衝材ブロックの名称	4-113
図 4.2.5-26	緩衝材の径方向の含水比試験結果	4-114
図 4.2.5-27	緩衝材の径方向の密度試験結果	4-115
図 4.2.6-1	送水量と緩衝材エロージョン量の関係	4-116
図 4.3.1-1	流量と緩衝材流出量の関係における湧水対策の意味	4-119
図 4.3.1-2	削孔→1次覆工→ベントナイト吹付け→2次覆工	4-120
図 4.3.1-3	処分孔としての使用可否、および湧水を有する処分孔の緩衝材の最適な施工法の	

決定チャートにおける本検討結果反映先.....	4-121
図 5.1.1-1 割れ目ネットワークモデルを用いた検討概要	5-3
図 5.1.1-2 各年度の検討の概念図.....	5-4
図 5.1.2-1 パネル方式における処分場建設および操業の基本イメージ	5-5
図 5.1.2-2 割れ目ネットワークモデルの例	5-7
図 5.1.2-3 水理地質構造モデルの透水係数と境界条件の概念図	5-8
図 5.1.2-4 複数坑道モデルの概要.....	5-10
図 5.1.2-5 処分坑道および EDZ のモデル化の概要	5-10
図 5.1.2-6 処分孔のモデル化の概要.....	5-10
図 5.1.2-7 緩衝材厚さに対するペクレ数の概算結果[3]	5-11
図 5.1.2-8 坑道の地下水通過流量と埋め戻し材透水係数の関係	5-12
図 5.1.2-9 処分坑道の埋戻し、処分孔への緩衝材定置のモデル化方法の概要	5-13
図 5.1.2-10 処分孔掘削後の施工順序の違いによる処分孔および処分坑道の状況.....	5-14
図 5.1.2-11 各解析ケースにおける処分孔、処分坑道の施工状況	5-15
図 5.1.2-12 各解析ケースでの G3 処分坑道湧水量.....	5-17
図 5.1.2-13 Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G3 処分坑道湧水変動量	5-18
図 5.1.2-14 Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G3 処分坑道湧水変動倍率	5-19
図 5.1.2-15 各解析ケースでの G2 処分坑道湧水量.....	5-21
図 5.1.2-16 Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G2 処分坑道湧水変動量	5-22
図 5.1.2-17 Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G2 処分坑道湧水変動倍率	5-23
図 5.1.2-18 各解析ケースでの G4 処分坑道湧水量.....	5-24
図 5.1.2-19 Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G4 処分坑道湧水変動量	5-25
図 5.1.2-20 Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G4 処分坑道湧水変動倍率	5-26
図 5.1.2-21 定置・埋戻しを行った場合の各ケースにおける G3 処分坑道湧水量の変化のま とめ.....	5-28
図 5.1.2-22 定置・埋戻しを行った場合の各ケースにおける G2 処分坑道湧水量の変化のま とめ.....	5-28
図 5.1.2-23 定置・埋戻しを行った場合の各ケースにおける G4 処分坑道湧水量の変化のま とめ.....	5-29
図 5.1.2-24 Case_A1 における、G2、G3、G4 処分坑道の湧水変動量	5-30
図 5.1.2-25 Case_B1 における、G2、G3、G4 処分坑道の湧水変動量	5-30
図 5.1.2-26 G1 処分坑道湧水量と CaseB1 の G3 処分坑道湧水変動量	5-31
図 5.1.2-27 G2 処分坑道湧水量と CaseB2 の G3 処分坑道湧水変動量	5-31
図 5.1.2-28 HR09P の処分孔掘削後の処分坑道壁面流量分布	5-32
図 5.1.2-29 HR09P の G3 処分坑道交差割れ目分布 (0.01L/min 以上)	5-32

図 5.1.2-30	Case_B2 における G3 処分坑道の湧水変動量と湧水変動率の関係	5-33
図 5.1.2-31	HR04P の G3 処分坑道交差割れ目分布 (0.01L/min 以上)	5-33
図 5.1.2-32	HR04P の Case_Initial と Case_B2 における処分坑道壁面流量分布 (展開図)	5-33
図 5.1.2-33	定置・埋戻し後の処分孔湧水量 (G3 処分坑道) (1)	5-36
図 5.1.2-34	定置・埋戻し後の処分孔湧水量 (G3 処分坑道) (2)	5-37
図 5.1.2-35	定置・埋戻し後の処分孔湧水変動量 (G3 処分坑道) (1)	5-39
図 5.1.2-36	定置・埋戻し後の処分孔湧水変動量 (G3 処分坑道) (2)	5-40
図 5.1.2-37	定置・埋戻し後の処分孔湧水変動倍率 (G3 処分坑道) (1)	5-42
図 5.1.2-38	定置・埋戻し後の処分孔湧水変動倍率 (G3 処分坑道) (2)	5-43
図 5.1.2-39	定置・埋戻しを行った場合の各ケースにおける G3 処分孔湧水量の変化のまとめ	5-44
図 5.1.2-40	定置・埋戻し後の処分孔湧水量 (G2 処分坑道) (1)	5-47
図 5.1.2-41	定置・埋戻し後の処分孔湧水量 (G2 処分坑道) (2)	5-48
図 5.1.2-42	定置・埋戻し後の処分孔湧水変動量 (G2 処分坑道) (1)	5-50
図 5.1.2-43	定置・埋戻し後の処分孔湧水変動量 (G2 処分坑道) (2)	5-51
図 5.1.2-44	定置・埋戻し後の処分孔湧水変動倍率 (G2 処分坑道) (1)	5-53
図 5.1.2-45	定置・埋戻し後の処分孔湧水変動倍率 (G2 処分坑道) (2)	5-54
図 5.1.2-46	定置・埋戻しを行った場合の各ケースにおける G2 処分孔湧水量の変化のまとめ	5-55
図 5.1.2-47	定置・埋戻し後の処分孔湧水量 (G4 処分坑道) (1)	5-58
図 5.1.2-48	定置・埋戻し後の処分孔湧水量 (G4 処分坑道) (2)	5-59
図 5.1.2-49	定置・埋戻し後の処分孔湧水変動量 (G4 処分坑道) (1)	5-61
図 5.1.2-50	定置・埋戻し後の処分孔湧水変動量 (G4 処分坑道) (2)	5-62
図 5.1.2-51	定置・埋戻し後の処分孔湧水変動倍率 (G4 処分坑道) (1)	5-64
図 5.1.2-52	定置・埋戻し後の処分孔湧水変動倍率 (G4 処分坑道) (2)	5-65
図 5.1.2-53	定置・埋戻しを行った場合の各ケースにおける G4 処分孔湧水量の変化のまとめ	5-66
図 5.1.2-54	Case_B2 における G3 処分坑道の処分孔湧水変動量と変動倍率の関係	5-67
図 5.1.2-55	Case_B1 における G2 処分坑道の処分孔湧水変動量と変動倍率の関係	5-67
図 5.1.2-56	HR06P の Case_Initial と Case_B2 における G3 処分坑道の処分孔流量分布図	5-68
図 5.1.2-57	HR08P の Case_Initial と Case_B2 における G3 処分坑道の処分孔流量分布図	5-68
図 5.1.2-58	HR07P の Case_Initial と Case_B1 における G2 処分坑道の処分孔流量分布図	5-69
図 5.1.2-59	HR09P の Case_Initial と Case_B1 における G3 処分坑道の処分孔流量分布図	5-69

図 5.1.3-1	0.01L/min 以上処分孔交差割れ目分布 (HR08P)	5-71
図 5.1.3-2	処分孔湧水量 (HR08P)	5-72
図 5.1.3-3	緩衝材定置のモデル化の概念図	5-73
図 5.1.3-4	緩衝材の透水係数を変化させたときの処分坑道湧水量の変化	5-75
図 5.1.3-5	緩衝材の透水係数を変化させたときの処分孔通過流量の変化	5-75
図 5.1.3-6	緩衝材の透水係数を変化させたときの処分孔領域 (処分孔 08) の全水頭分布	5-76
図 5.1.3-7	処分孔と EDZ のモデル化の概念図 (パイプの配置)	5-77
図 5.1.3-8	処分孔と EDZ のモデル化の概念図 (断面形状)	5-77
図 5.1.3-9	モデル上での通過流量算定箇所の概念図	5-78
図 5.1.3-10	EDZ を考慮しない場合の各処分孔における透水係数と緩衝材通過流量の関係	5-80
図 5.1.3-11	EDZ を考慮しない場合の各処分孔における透水係数と処分孔直近通過流量の関係	5-81
図 5.1.3-12	緩衝材の平均全水頭の算定方法の概念図	5-82
図 5.1.3-13	EDZ を考慮しない場合の各処分孔における 透水係数と緩衝材の全水頭 (全節点の平均値) の関係	5-82
図 5.1.3-14	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 01)	5-83
図 5.1.3-15	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 02)	5-83
図 5.1.3-16	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 03)	5-83
図 5.1.3-17	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 04)	5-84
図 5.1.3-18	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 05)	5-84
図 5.1.3-19	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 06)	5-84
図 5.1.3-20	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 07)	5-85
図 5.1.3-21	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 08)	5-85
図 5.1.3-22	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 09)	5-85
図 5.1.3-23	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 10)	5-86
図 5.1.3-24	EDZ を考慮しない場合の緩衝材および処分孔直近通過流量の関係 (1)	5-88

図 5.1.3-25	EDZ を考慮しない場合の緩衝材および処分孔直近通過流量の関係 (2) ...	5-89
図 5.1.3-26	EDZ を考慮しない場合の緩衝材および処分孔直近通過流量の関係 (3) ...	5-90
図 5.1.3-27	EDZ を考慮しない場合の、各領域の通過流量の比率 (1)	5-91
図 5.1.3-28	EDZ を考慮しない場合の、各領域の通過流量の比率 (2)	5-92
図 5.1.3-29	EDZ を考慮しない場合の、各領域の通過流量の比率 (3)	5-93
図 5.1.3-30	EDZ を考慮した場合の透水係数と緩衝材通過流量の関係.....	5-95
図 5.1.3-31	EDZ を考慮した場合の透水係数と EDZ 部通過流量の関係	5-96
図 5.1.3-32	EDZ を考慮する場合の透水係数と緩衝材の全水頭の関係.....	5-98
図 5.1.3-33	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 01)	5-99
図 5.1.3-34	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 02)	5-99
図 5.1.3-35	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 03)	5-99
図 5.1.3-36	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 04)	5-100
図 5.1.3-37	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 05)	5-100
図 5.1.3-38	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 06)	5-100
図 5.1.3-39	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 07)	5-101
図 5.1.3-40	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 08)	5-101
図 5.1.3-41	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 09)	5-101
図 5.1.3-42	緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 10)	5-102
図 5.1.3-43	EDZ を考慮した場合の境界部および EDZ 部通過流量の関係(処分孔平均) (1)	5-103
図 5.1.3-44	EDZ を考慮した場合の境界部および EDZ 部通過流量の関係(処分孔平均) (2)	5-104
図 5.1.3-45	EDZ を考慮した場合の境界部および EDZ 部通過流量の関係(処分孔平均) (3)	5-105
図 5.1.3-46	EDZ を考慮した場合の、各領域の通過流量の比率 (処分孔平均) (1) ...	5-106
図 5.1.3-47	EDZ を考慮した場合の、各領域の通過流量の比率 (処分孔平均) (2) ...	5-107
図 5.1.3-48	EDZ を考慮した場合の、各領域の通過流量の比率 (処分孔平均) (3) ...	5-108
図 5.1.3-49	EDZ の有無による通過流量および全水頭の比較 (処分孔 01)	5-110

図 5.1.3-50	モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔 02)	5-110
図 5.1.3-51	モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔 03)	5-111
図 5.1.3-52	モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔 04)	5-111
図 5.1.3-53	モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔 05)	5-112
図 5.1.3-54	モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔 06)	5-112
図 5.1.3-55	モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔 07)	5-113
図 5.1.3-56	モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔 08)	5-113
図 5.1.3-57	モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔 09)	5-114
図 5.1.3-58	モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔 10)	5-114
図 5.1.3-59	モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔平均)	5-115
図 5.1.3-60	EDZ ありモデルの EDZ 通過流量と EDZ なしモデルの処分孔直近通過流量 (処分孔 08)	5-116
図 5.1.3-61	処分孔 08 周辺の割れ目分布 (0.01L/min 以上) および全水頭分布図 (1.0×10^{-12} m/sec)	5-117
図 5.1.3-62	EDZ を考慮しない条件における深度と全水頭の関係 (透水係数 1.0×10^{-12} m/sec) (1)	5-119
図 5.1.3-63	EDZ を考慮しない条件における深度と全水頭の関係 (透水係数 1.0×10^{-12} m/sec) (2)	5-120
図 5.1.3-64	処分孔 01～処分孔 04 に交差する割れ目分布 (0.01L/min 以上) と緩衝材の全水頭分布図 (1.0×10^{-12} m/sec)	5-120
図 5.1.3-65	処分孔 03 周辺の割れ目分布 (0.01L/min 以上) および全水頭分布図およびパイプ流量分布図 (1.0×10^{-12} m/sec)	5-121
図 5.1.3-66	処分孔 07 周辺の割れ目分布 (0.01L/min 以上) および全水頭分布図 (1.0×10^{-12} m/sec)	5-121
図 5.1.3-67	処分孔 09、処分孔 10 に交差する 0.01L/min 以上の割れ目分布 および全水頭分布図 (1.0×10^{-12} m/sec)	5-122
図 5.1.3-68	各条件における処分孔周辺の湧水挙動 (処分孔平均)	5-123
図 5.2.2-1	正規圧密曲線	5-127
図 5.2.2-2	種々の平面で描かれる正規圧密曲線と膨潤曲線.....	5-132
図 5.2.2-3	Na 型ベントナイトの飽和点及び正規圧密状態と完全飽和線	5-139
図 5.2.2-4	一次元圧密・除荷・再載荷シミュレーション結果.....	5-140
図 5.2.2-5	乾燥密度と圧密圧力の対数の関係で表した膨潤曲線の勾配の変化	5-141
図 5.3.2-1	試験体の写真 (左図) および模式図 (右図)	5-142
図 5.3.3-1	モデルで使用されるベントナイトの熱伝導率.....	5-143
図 5.3.3-2	モデルで適用された保持曲線.....	5-144
図 5.3.3-3	モデル化された試験系と境界条件	5-144
図 5.3.3-4	試験時の注水圧とモデル化された注水圧	5-145
図 5.3.4-1	供試体への流入 (浸潤) 量	5-145

図 5.3.4-2	飽和プロファイルのモデル結果と試験結果の比較.....	5-146
図 5.3.4-3	異なる温度による飽和フロントの位置.....	5-146
図 5.3.4-4	(a)-(c) 中央の温度が異なる時間に変化するときの飽和プロファイル.....	5-147
図 5.3.4-5	理想気体の状態方程式によりモデル化された間隙空気圧.....	5-148
図 5.3.4-6	閉鎖系と開放系でのモデル化された水の流入量と試験データとの比較....	5-149
図 5.3.4-7	間隙空気圧と給水速度の経時変化.....	5-149
図 6.1.1-1	緩衝材の設計フロー (NUMO,2016).....	6-2
図 6.1.1-2	検討手順.....	6-3
図 6.1.1-1	緩衝材の設計要件の関連性の整理 (処分孔縦置き・ブロック式の例).....	6-14
図 6.1.1-2	設計要件の関連性.....	6-15
図 6.1.1-3	直列膨潤圧試験機.....	6-17
図 6.1.1-4	直列膨潤圧試験結果.....	6-17
図 6.1.1-5	残留密度分布の力学的解釈 (小林ほか、2010).....	6-17
図 6.1.1-6	試験概念図(左：小規模試験、右：長尺試験) (竹内ほか、2013).....	6-18
図 6.1.1-7	エロージョン質量と総流量の関係 (小林ほか、2014).....	6-19
図 6.1.2-1	緩衝材の断面のイメージ.....	6-21
図 6.1.2-2	緩衝材の軸直角方向を通過する地下水流れのイメージ.....	6-22
図 6.1.2-3	緩衝材中の平均地下水流速を説明するための概念図.....	6-23
図 6.1.2-4	緩衝材の厚さに対応するペクレ数の試算結果.....	6-24
図 6.1.2-5	有効粘土密度と透水係数の関係 (クニゲル V1、人工海水).....	6-25
図 6.1.2-6	検討において想定した仕様 (施工時).....	6-26
図 6.1.2-7	密度分布に関する検討の流れ.....	6-26
図 6.1.2-8	各ケースの検討イメージ.....	6-27
図 6.1.2-9	膨潤後の密度の試算 (case2).....	6-28
図 6.1.2-10	膨潤後の密度の試算 (case3).....	6-28
図 6.1.2-11	各ケースの膨潤後の密度分布の試算結果.....	6-29
図 6.1.2-12	各ケースの膨潤後、平衡状態における透水係数.....	6-30
図 6.1.2-13	緩衝材中の地下水流速 (最大値) の分布.....	6-31
図 6.1.2-14	想定し得る緩衝材中の地下水流速分布のイメージ.....	6-31
図 6.1.2-15	検討ケースおよび各ケースの流速分布イメージ.....	6-32
図 6.1.2-16	緩衝材中の地下水流速分布の試算結果 (動水勾配直交方向).....	6-33
図 6.1.2-17	緩衝材中の地下水流速分布の試算結果 (動水勾配平行方向).....	6-33
図 6.1.2-18	緩衝材中の平均地下水流速を説明するための概念図 (再掲).....	6-34
図 6.1.2-19	コロイドろ過効果を発揮する緩衝材密度とケイ砂混合率の関係 (JNC、2003)	6-36
図 6.1.2-20	膨潤余裕代の概念と従来手法の課題.....	6-36
図 6.1.2-21	隙間量と従来の設計指標との対応.....	6-37
図 6.1.2-22	最大膨潤率と初期乾燥密度の関係 (田中ほか、2005).....	6-38

図 6.1.2-23	ガス破過前後の透水係数の比較 (田中ほか、2009)	6-40
図 6.1.2-24	ベントナイトの $e \cdot \log p'$ 関係の模式図 (笹倉ほか、2003)	6-41
図 6.1.2-25	オーバーパック耐圧厚さと緩衝材厚さの関係 (JNC、1999 に追記)	6-42
図 6.1.2-26	緩衝材厚さと緩衝材の圧密反力の関係 (JNC、1999 に追記)	6-42
図 6.1.2-27	SRB 増殖試験結果 (谷口ほか、2001 に追記)	6-44
図 6.1.2-28	各設計要件に対する緩衝材の仕様範囲の例示 (「処分孔縦置き・ブロック式」)	6-46
図 6.1.2-29	各設計要件に対する緩衝材の仕様範囲の例示	6-46
図 6.1.2-30	各設計要件に対する緩衝材の仕様範囲の例示	6-47
図 6.1.2-31	各設計要件に対する緩衝材の仕様範囲の例示	6-47
図 6.1.2-32	各設計要件に対する緩衝材の仕様範囲の例示 (「横置き PEM・吹付け (有人施工)」)	6-48
図 6.1.2-33	各設計要件に対する緩衝材の仕様範囲の例示 (「横置き PEM・吹付け (無人施工)」)	6-48
図 6.1.2-34	流量とエロージョン量との関係における湧水対策の方法 (鈴木ほか、2014)	6-50
図 6.1.2-35	エロージョン質量と総流量の関係 (再掲)	6-50
図 6.1.2-36	緩衝材の設計フロー	6-52
図 6.1.2-37	緩衝材の仕様範囲の設定例 (PEM・撒出し締固め式の例)	6-53
図 6.1.2-38	湧水の影響を考慮した緩衝材の設計・施工全体フロー (案)	6-54
図 6.1.2-39	②縦置き・定置時の課題に対する設計・施工フロー	6-55
図 6.1.2-40	③縦置き・定置後の課題に対する設計・施工フロー	6-56
図 6.1.3-1	有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係 (地盤工学会ほか、2016)	6-57
図 6.1.3-2	有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係 (イオン強度 ≈ 0)	6-58
図 6.1.3-3	有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係 ($0 < \text{イオン強度} \leq 0.5$)	6-58
図 6.1.3-4	有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係 ($0.5 < \text{イオン強度} \leq 1.0$)	6-59
図 6.1.3-5	2層膨潤状態のイメージ (小林ほか、2015)	6-60
図 6.1.3-6	KC 則と実測値の比較 (Na 型モンモリロナイト)	6-61
図 6.2.1-1	ベントナイト密度の湿潤密度と微生物活動に関する SKB の試験結果	6-62
図 6.2.2-1	有効粘土密度と透水係数の関係 (クニゲル V1、蒸留水)	6-64
図 6.2.2-2	有効粘土密度と透水係数の関係 (クニゲル V1、人工海水)	6-64
図 6.2.2-3	透水係数に対する試験温度の影響 (クニゲル V1、蒸留水)	6-65
図 6.2.2-4	モンモリロナイト含有率 C_m と透水係数の関係 (100%クニゲル V1、蒸留水)	6-66
図 6.2.2-5	モンモリロナイト含有率 C_m と透水係数の関係 (100%クニゲル V1、人工海水)	6-66

図 6.2.2-6	有効粘土密度と透水係数の関係（クニゲル V1、人工海水）（再掲）	6-67
図 6.2.2-7	各設計要件に対する緩衝材の仕様範囲の例示（透水性のばらつき考慮）	6-68
表 1.2.2-1	5 カ年の研究開発計画	1-3
表 1.3.3-1	全体計画（緩衝材）	1-8
表 1.3.3-2	今年度の実施項目	1-9
表 2.1.1-1	長尺ベントナイト供試体を用いた一次元浸潤速度取得試験のケース	2-3
表 2.1.2-1	長尺ベントナイトの膨潤変形取得試験ケース一覧	2-12
表 2.2.2-1	密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験条件	2-21
表 2.2.2-2	直列膨潤量試験の解体結果	2-26
表 2.2.2-3	直列膨潤量試験の解体結果	2-28
表 2.2.2-4	直列膨潤量試験の解体結果	2-29
表 2.2.3-1	応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験条件	2-31
表 2.2.3-2	応力履歴の影響評価のための直列膨潤量試験（再現性確認ケース）の解体結果	2-35
表 2.2.3-3	過圧密供試体と正規圧密供試体の直列膨潤量試験の解体結果	2-37
表 2.2.3-4	正規圧密供試体の膨潤量試験の解体結果	2-38
表 2.2.3-5	過圧密供試体の直列膨潤量試験の解体結果	2-39
表 2.2.4-1	直列膨潤圧試験結果に基づく残留密度分布と透水係数	2-45
表 3.1.2-1	Ca 型化が圧縮ベントナイトの力学挙動に及ぼす影響試験ケース	3-2
表 3.1.2-2	試験供試体諸元	3-2
表 3.1.3-1	通水量から算出した Ca 当量 / CEC	3-5
表 3.1.3-2	排水分析結果（mg/L）	3-6
表 3.1.3-3	排水分析結果（mmol/L）	3-7
表 3.2.2-1	分析対象	3-13
表 3.2.2-2	分析項目（液相）	3-15
表 3.2.2-3	分析項目（固相）	3-16
表 3.2.3-1	変質ベントナイトの膨潤圧と破過圧の関係取得試験	3-21
表 3.2.3-2	膨潤圧と破過圧の関係取得試験供試体諸元	3-22
表 3.2.3-3	膨潤圧と破過圧の関係取得試験供試体諸元（飽和度影響）	3-28
表 3.2.3-4	液相分析結果	3-37
表 3.2.3-5	炭素鋼と溶接金属の微量成分（Mitsui et al. 2006）	3-37
表 3.2.3-6	炭素鋼試料の重量と水素放出量	3-39
表 3.2.3-7	炭素鋼の水素含有量	3-40
表 3.2.3-8	炭素鋼接触、非接触ベントナイトの全岩化学組成	3-48
表 3.2.3-9	湿度制御 XRD 測定結果のまとめ	3-66
表 3.2.3-10	炭素鋼接触ベントナイトの CEC 測定結果	3-67
表 3.2.3-11	海水系炭素鋼の被覆層の化学組成	3-91

表 3.2.3-12	淡水系炭素鋼の被覆層の化学組成	3-92
表 3.2.3-13	回収されたベントナイトの全岩化学分析値.....	3-116
表 3.2.3-14	幌延ベントナイト試験試料の CEC 測定結果	3-123
表 3.2.3-15	回収された溶液および固相試料の洗浄溶液の化学組成.....	3-124
表 3.2.3-16	炭素鋼接触ベントナイトの相互作用の要素関連表.....	3-149
表 3.2.3-17	溶液系における変質相の違い.....	3-151
表 3.3.2-1	流出試験溶液と回収した固相間隙水の化学組成分析値.....	3-160
表 3.3.2-2	流出試験試料の陽イオン交換容量測定結果.....	3-161
表 3.3.2-3	EDS 分析により得られたモンモリロナイトの陽イオン組成.....	3-162
表 3.3.2-4	モンモリロナイトと間隙水の間陽イオン交換平衡定数.....	3-163
表 3.3.2-5	イオン交換分配係数の比較	3-164
表 3.3.2-6	解析に用いた液相条件.....	3-164
表 3.3.2-7	クニゲル V1 の鉱物組成.....	3-165
表 3.3.2-8	ベントナイトの交換性陽イオン組成（流出試験結果より）	3-165
表 3.3.2-9	ベントナイトの初期鉱物組成.....	3-165
表 3.3.2-10	初期イオン交換サイト量.....	3-165
表 3.3.2-11	解析結果_Kd-実験より求めた値（液組成）	3-166
表 3.3.2-12	解析結果_Kd-TRU2[3]（液組成）	3-166
表 3.3.2-13	解析結果_Kd-実験より求めた値（イオン交換サイト量[meq/100g]）	3-167
表 3.3.2-14	解析結果_Kd-TRU2（イオン交換サイト量[meq/100g]）	3-167
表 4.1.2-1	エロージョン現象に対するケイ砂含有率の影響検討ケース	4-2
表 4.1.2-2	エロージョン現象に対するケイ砂含有率の影響検討試験の供試体諸元	4-3
表 4.1.3-1	圧力一定条件での緩衝材流出試験ケース	4-8
表 4.1.3-2	高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験用供試体諸元	4-11
表 4.1.4-1	模擬結晶質岩盤の流出試験検討ケース	4-17
表 4.2.2-1	水位計の仕様	4-33
表 4.2.2-2	湧水量測定の場合設定一覧.....	4-34
表 4.2.2-3	各ケースの平均湧水量.....	4-35
表 4.2.3-1	水理試験に使用したプラグ 仕様	4-39
表 4.2.3-2	水理試験ケース.....	4-40
表 4.2.3-3	水理試験結果（緩衝材流出試験実施前）	4-44
表 4.2.3-4	水理試験結果（全ケース）	4-47
表 4.2.4-1	緩衝材流出試験に使用した装置の仕様（1）	4-50
表 4.2.4-2	緩衝材流出試験に使用した装置の仕様（2）	4-51
表 4.2.4-3	緩衝材ブロックの仕様.....	4-55
表 4.2.4-4	使用したシール材.....	4-61
表 4.2.4-5	分光光度計仕様.....	4-64
表 4.2.4-6	超音波分散器仕様.....	4-65

表 4.2.5-1	緩衝材外側の膨潤量測定結果（参考値）	4-105
表 4.2.5-2	採取したコアの土質試験結果.....	4-111
表 4.2.5-3	緩衝材ブロック（F 段、上から 6 段目）の最外周部の含水比.....	4-112
表 4.2.5-4	緩衝材の径方向の含水比.....	4-114
表 4.2.5-5	緩衝材の径方向の密度試験結果.....	4-115
表 4.3.1-1	処分施設の湧水対策一覧.....	4-125
表 4.3.1-2	現時点で考えられる影響低減対策の検討	4-125
表 5.1.2-1	割れ目の幾何学的パラメータセット.....	5-6
表 5.1.2-2	水理モデル作成のためのパラメータセット.....	5-8
表 5.1.2-3	各解析ケースでの G3 処分坑道湧水量の算定結果.....	5-16
表 5.1.2-4	Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G3 処分坑道湧水変動量の算定結果.....	5-17
表 5.1.2-5	Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G3 処分坑道湧水変動倍率の算定結果.....	5-18
表 5.1.2-6	各解析ケースでの G2 処分坑道湧水量の算定結果.....	5-20
表 5.1.2-7	Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G2 処分坑道湧水変動量の算定結果.....	5-21
表 5.1.2-8	Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G2 処分坑道湧水変動倍率の算定結果.....	5-22
表 5.1.2-9	各解析ケースでの G4 処分坑道湧水量の算定結果.....	5-24
表 5.1.2-10	Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G4 処分坑道湧水変動量の算定結果.....	5-25
表 5.1.2-11	Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G4 処分坑道湧水変動倍率の算定結果.....	5-26
表 5.1.2-12	定置・埋戻し後の処分孔湧水量算定結果（G3 処分坑道）	5-35
表 5.1.2-13	定置・埋戻し後の処分孔湧水変動量算定結果（G3 処分坑道）	5-38
表 5.1.2-14	定置・埋戻し後の処分孔湧水変動倍率算定結果（G3 処分坑道）	5-41
表 5.1.2-15	G3 処分坑道における各解析ケースでの超過孔数	5-44
表 5.1.2-16	定置・埋戻し後の処分孔湧水量算定結果（G2 処分坑道）	5-46
表 5.1.2-17	定置・埋戻し後の処分孔湧水変動量算定結果（G2 処分坑道）	5-49
表 5.1.2-18	定置・埋戻し後の処分孔湧水変動倍率算定結果（G2 処分坑道）	5-52
表 5.1.2-19	G2 処分坑道における各解析ケースでの超過孔数	5-55
表 5.1.2-20	定置・埋戻し後の処分孔湧水量算定結果（G4 処分坑道）	5-57
表 5.1.2-21	定置・埋戻し後の処分孔湧水変動量算定結果（G4 処分坑道）	5-60
表 5.1.2-22	定置・埋戻し後の処分孔湧水変動倍率算定結果（G4 処分坑道）	5-63
表 5.1.2-23	G4 処分坑道における各解析ケースでの超過孔数	5-66
表 5.1.3-1	モデル中央の処分坑道および処分孔湧水量（HR08P）	5-72
表 5.1.3-2	緩衝材の透水係数の設定値に対する低減係数.....	5-73

表 5.1.3-3	緩衝材の透水係数の設定値と処分孔通過流量の関係	5-74
表 5.1.3-4	解析ケース	5-78
表 5.1.3-5	EDZ を考慮しない場合の各処分孔における緩衝材通過流量算定結果	5-79
表 5.1.3-6	EDZ を考慮しない場合の各処分孔における処分孔直近の通過流量算定結果	5-80
表 5.1.3-7	EDZ を考慮しない場合の各処分孔における 緩衝材の全水頭（全節点の平均値） の算定結果	5-82
表 5.1.3-8	EDZ を考慮した場合の緩衝材通過流量算定結果	5-95
表 5.1.3-9	EDZ を考慮した場合の EDZ 部通過流量算定結果	5-96
表 5.1.3-10	EDZ を考慮する場合の緩衝材の全水頭算定結果	5-97
表 6.1.1-1	緩衝材の設計要件（NUMO、2016）	6-2
表 6.1.1-2	検討対象とする処分方式および緩衝材の施工方法	6-3
表 6.1.1-1	機能の定義	6-4
表 6.1.1-2	処分システムに求められる安全機能と対応する構成要素（NUMO-TR-11-01）	6-5
表 6.1.1-3	緩衝材に求められる機能への対応	6-6
表 6.1.1-4	緩衝材の要求機能／安全機能に対する影響要因（1/2）	6-7
表 6.1.1-5	緩衝材の要求機能／安全機能に対する影響要因（2/2）	6-8
表 6.1.1-6	影響要因への対応方針	6-12
表 6.1.1-7	再抽出した緩衝材の設計要件	6-15
表 6.1.1-8	本検討で着目する設計要件への影響因子と知見	6-16
表 6.1.2-1	設計要件を充足する緩衝材の仕様の設定方法	6-20
表 6.1.2-2	低透水性に対する指標および基準（案）	6-20
表 6.1.2-3	隙間を考慮した膨潤後の密度分布に関する検討ケース	6-26
表 6.1.2-4	高密度部と低密度部の厚さおよび密度（case2）	6-29
表 6.1.2-5	高密度部と低密度部の厚さおよび密度（case3）	6-29
表 6.1.2-6	各ケースの緩衝材中の地下水流速の最大値および平均値	6-34
表 6.1.2-7	緩衝材の初期乾燥密度と最大流速（ケース b 相当）	6-35
表 6.1.2-8	コロイドろ過性に対する指標および基準（案）	6-35
表 6.1.2-9	自己シール性に対する指標および基準（案）	6-37
表 6.1.2-10	田中ほか（2005）[14]の膨潤変形試験に供したベントナイトの基本的性質	6-38
表 6.1.2-11	一軸透水・透気試験結果（穂刈ほか、1996）	6-40
表 6.1.2-12	応力緩衝性に対する指標および基準（案）	6-40
表 6.1.2-13	製作施工性に対する指標および基準（案）	6-43
表 6.1.2-14	緩衝材の製作または例	6-43
表 6.1.2-15	微生物影響防止に対する指標および基準（案）	6-43
表 6.1.2-16	処分方式・施工方法に対応して設定した施工時の隙間	6-45
表 6.1.2-17	各設計要件に対して設定した基準	6-45
表 6.1.2-18	再整理した設計要件と仕様の設計方法	6-49

表 7.2.2-1 溶液系における変質相の違い.....	7-5
------------------------------	-----

第1章 はじめに

1.1 本事業の背景および目的

我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って放射性廃棄物が既に発生しており、その処理・処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物等の地層処分については、事業実施に向けた取組が進められており、処分技術のさらなる信頼性の向上にむけた基盤技術の開発が、事業の段階的なプロセスを考慮して実施されている。

これまでに、処分場の操業期間中におけるガラス固化体のオーバーパックへの封入・検査技術、オーバーパックの周囲に設置される緩衝材の施工技術及び人工バリアのモニタリング技術等の要素技術について、必要となる基盤技術が整備されてきた。今後、さらなる処分技術の信頼性向上のためには実際の深部地下環境での活用を通して、これらの工学的な要素技術の信頼性を高める必要がある。さらに、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえ、操業期間中における自然災害である巨大地震や巨大津波等の安全対策に関する基盤技術の整備も喫緊の課題となっている。

平成 27 年 5 月には“特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針”が改定され、「国および関係研究機関は、最終処分の安全規制・安全評価のために必要な研究開発、深地層の科学的研究等の基盤的な研究開発及び最終処分技術の信頼性の向上に関する技術開発等を積極的に進めていくものとする。」ということが示された[1]。

本事業では、平成 25 年度から 5 年程度の期間で処分場の操業期間中における人工バリアの製作・施工技術及びモニタリング技術等の工学技術を、地下研究施設を活用して確証していくとともに、自然災害に対する操業期間中の工学的対策に関する基盤技術の整備を行う。

1.2 本事業の構成および全体計画

1.2.1 研究開発項目の構成

上記の目的を達成するために、本事業は以下の 5 つの研究開発項目で構成されている。各研究開発項目の内容については、それぞれの分冊に記載する。

- 1) (第 1 分冊) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック
- 2) (第 2 分冊) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材
- 3) (第 3 分冊) 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築
- 4) (第 4 分冊) モニタリング関連技術の整備
- 5) 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発※

※平成 27 年度に取りまとめを実施したため、平成 28 年度からは成果普及に取り組んだ。

1.2.2 本事業における設定課題と 5 ヶ年の計画

本事業では、地層処分における工学技術に対する信頼性を向上させるために、人工バリアのうちのオーバーパックおよび緩衝材の品質／健全性評価手法の構築やモニタリング関連技術の整備、自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発に取り組む。人工バリアに要求さ

れる機能は、それぞれが単独で達成するものではなく、各要素が相互に影響をおよぼし合い、人工バリアシステムとしての要求機能が達成される。そのため、平成 27 年度からは、周辺岩盤挙動を含めて人工バリアの長期挙動を評価するための手法の構築に向けた取り組みを開始した。本事業の 5 カ年の実施計画を表 1.2.2-1 に示す。

一般的な構造物とは異なり、オーバーパックと緩衝材に対しては共用後（埋設後）の検査や必要に応じた補修を行うことが想定されていない。そのため、オーバーパックと緩衝材の品質/健全性は、定置前の段階で確認しておく必要がある。また、処分場の掘削・操業期間から人工バリア定置後の地下水位の回復にともなう擾乱期（再冠水過程）には、緩衝材の流出や地下水の浸潤による変質などによる材料劣化も想定される。したがって、検査や補修を必要とせず人工バリアの健全性を確保するためには、埋設後に想定される劣化事象を考慮した上で要求される機能を満足できる設計を行い、製作・検査・施工の各プロセスで品質管理を実施することによりそれらの品質を保証する必要がある。

一方で、埋設後の人工バリアの性能を確認するためには、処分場の環境条件を把握する必要がある。また、処分場の環境条件を把握することは、処分場閉鎖の判断要因の一つとして利用されることも考えられる。そのためは、人工バリアおよびモニタリングに関する個別および境界の課題を抽出し、相互に共有され検討を進める必要がある。さらに、処分場の操業期間中に大規模な自然災害が発生することも考えられるため、想定される災害事象に対する安全確保対策について検討しておくことが重要となる。

長期間の健全性を有する人工バリアシステムの工学的実現性を示すためには、オーバーパック、緩衝材、人工バリアの長期挙動、モニタリング、自然災害に対する安全対策の 5 つの検討項目について、それぞれの境界にある課題や個々の成果などを共有しつつ研究開発を進める。

表 1.2.2-1 5カ年の研究開発計画

		H25	H26	H27(計画更新)	H28	H29
(1) 処分システム工学確証技術開発						
	1) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック	・判断指標の抽出 ・健全性評価モデル案の作成 ・研究開発計画策定	・判断指標に影響する劣化事象の抽出	・破壊評価に基づく限界欠陥寸法の提示	・材料劣化を考慮した品質評価法の提案	・品質評価／健全性評価手法の提案 ・健全性判断指標および基準値設定の考え方の例示
	2) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材	・緩衝材の品質評価項目の抽出 ・研究開発計画策定	・エロージョンによる性能劣化事象(流入量、液種)の定量化	・ウォーターマネジメント(人工注水、グラウト等)の実施方法・課題の提案	・緩衝材の設計・施工仕様策定に資する指標範囲の提示	
	3) 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築			・試験研究計画の立案 ・遠心力模型試験による加速データの取得、および要素試験による解析パラメータの取得	データの検証および長期挙動評価手法への課題の提示	再冠水後の試験データによる長期挙動の評価方法論、および検証データの提示
	3) モニタリング関連技術の整備	・性能確認モニタリングの課題抽出 ・研究開発計画策定	・操業安全等に関するモニタリングの課題抽出	・地下調査施設による地中無線モニタリング技術の確証	・性能確認モニタリング結果反映方法提案	・実現可能な技術選択肢による人工バリア等のモニタリング計画の例示
(2) 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発		・検討手法等の適用性の確認 ・研究開発計画策定	・火災事象に対する人工バリアの健全性の把握	・火災事象に対する施設計画時の制約事項等の提案		

・人工バリアの健全性を確保するための判断指標および人工バリア製作・施工手法の提示

5年間の成果目標

・技術的実現性と結果の反映方法が確保されたモニタリング計画立案手法の提示

・自然災害に対する工学的対策技術に裏付けられた施設計画手法の提示

1.3 人工バリア品質/健全性評価手法の構築—緩衝材

1.3.1 背景と目的

緩衝材は施工後、再冠水により、不飽和状態から飽和に至る過程をたどることになる。このため、再冠水期間は緩衝材の性状が最も変化する時期であり、その変化は地下水の浸潤により起こり、力学的な変化が大きい。一方、再冠水後は、緩衝材に作用する外力は天然バリアのクリープ挙動程度であり、挙動が緩慢な化学的な変質が支配的となる。この緩衝材の定置から再冠水終了後までの期間における変化を把握し、再冠水後の緩衝材の状態を予測することは、再冠水後に安全評価の初期状態を示すという意味で重要である。また、安全評価の求める初期性能を発揮するために必要となる工学的対策を構築するためにも重要である。現状では、緩衝材の定置から長期性能までの緩衝材の性能を連続的に評価する手法の整備がなされておらず、安全評価の初期状態は施工時の設計値が用いられ、さらに緩衝材の状態は、完全飽和、密度均一を初期状態と仮定している。この仮定は状態予測の手法がなかったための設定であるため、再冠水後の緩衝材の状態の予測を基に安全評価が行われることが望ましい。そのために、緩衝材の施工品質が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響を考慮して、再冠水時の挙動の定量的（解析的）な評価技術が必要となる。図 1.3.1-1 に示すように、緩衝材の定置から再冠水後までに緩衝材は周辺の変化と共に状態、性能が変化する可能性があると考えられる。これを連続的に評価し、安全性能評価の初期状態を予測することが安全評価の精度を高めることにつながる。

本事業の前のフェーズである平成 20 年度から平成 24 年度の再冠水期間を対象とした緩衝材に関する調査[2]においては、湧水量が多い日本の地下環境では施工直後に緩衝材の流出が起こり、緩衝材の性能の低下につながる密度低下を招くことが懸念されるため、重要な課題であると考えられた。緩衝材ブロックとしてクニゲル V1 70wt%+ケイ砂 30wt%を用いて、緩衝材の再冠水挙動について実験を行い、緩衝材の初期の密度分布は膨潤しても均質化せず密度分布が残ることや、隙間を有する緩衝材施工では湧水量によっては水みちが発生し、ベントナイトの成分が流出することを確認した。さらに、0.5mol/l の NaCl 水溶液が 0.1L/分の流速で下から上に流出する塩水環境においては、ケイ砂が分離し、水みちが緩衝材の膨潤によって閉塞しないことを確認した。このことは、施工時に設計仕様を満足する緩衝材を施工しても再冠水中に流出（透水性が増加）する可能性があり、塩水環境下では淡水系の地下水環境に比べ、緩衝材の流出の影響が大きい可能性があることを示している。

平成 25 年度からの本事業では、長期にわたる試験は継続的に行うことによって現象把握のための試験を行い、得られた試験結果により現象をモデル化し、解析的評価に資することを目標とした。再冠水時の挙動を数値解析によって再現し、再冠水後の緩衝材の状態を予測することによって、長期の安全性評価の初期状態を示すことが目的である。また、緩衝材の流出に関しては、室内試験でその発生の境界値を得る試験を行うと共に、地下環境での多様な要素が影響する条件での試験を行うこととした。地下環境での実現象を理解し、室内試験で行われた工学的対策の効果の確認試験を地下環境で確認することによって、緩衝材流出現象による緩衝材の性能劣化につ

ながら密度低下を防ぐことを目的としている。さらに、安全評価から求められる緩衝材の性能を確保するために、緩衝材の再冠水期間に起こる性能低下を抑制することを念頭に、設計の指標、施工材料、施工方法について整理し、提示することを目的とした。

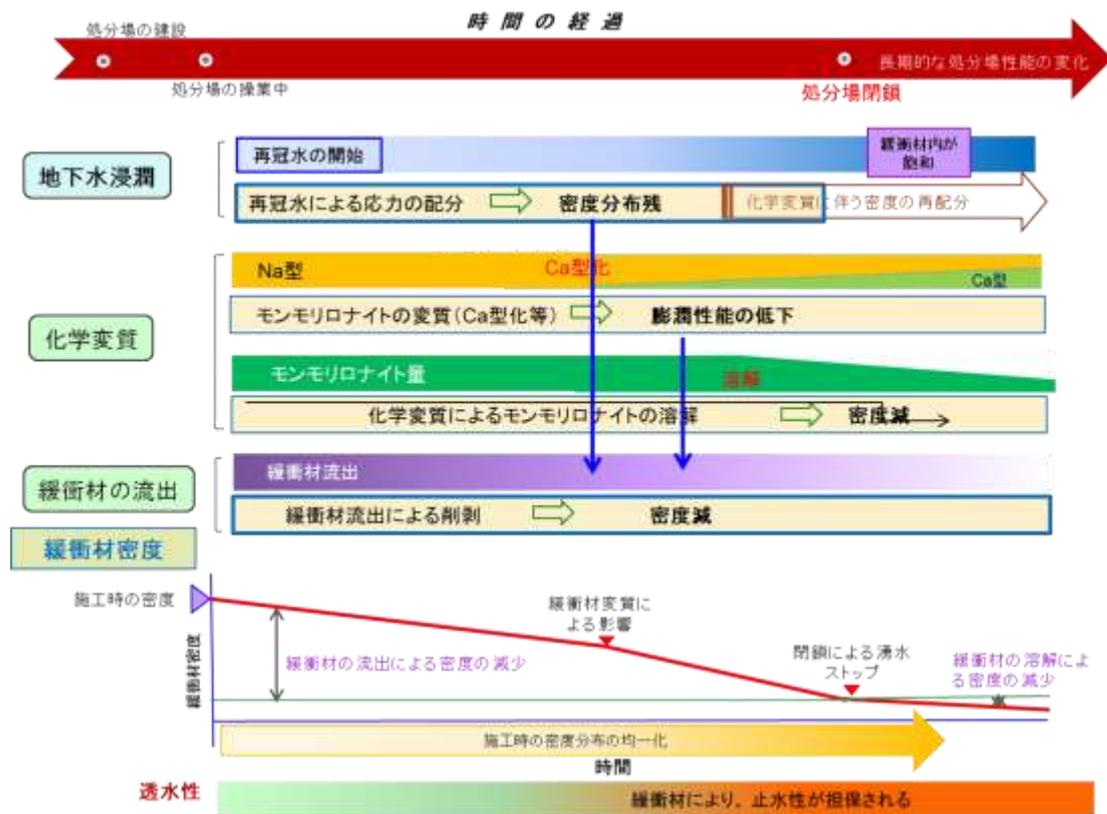


図 1.3.1-1 緩衝材の時系列の変化のイメージ

1.3.2 調査研究のアプローチ

緩衝材の安全評価からの要件に基づく設計値は、再冠水時に緩衝材に生じる現象を網羅的に考慮したものであることが望ましい。緩衝材の設計値として考えられる要素として、初期乾燥密度、厚さ及び材料の選択（ケイ砂との混合率等）等が挙げられる。本研究では、これらの設計値の中で、施工時及び再冠水後の緩衝材の乾燥密度を指標として緩衝材の性能について検討する。緩衝材の乾燥密度は、再冠水時に生じる地下水の浸潤の速度や緩衝材の膨潤性能に影響を与える一方、緩衝材が処分孔外に流出することにより低下する。そのため、再冠水期間に緩衝材に起こる変性能の低下は、緩衝材の緩衝材の密度の低下に置き換えることができると考えられる。また、緩衝材の性能に関しては、乾燥密度をパラメータとして整理されているため、乾燥密度を指標とすることが緩衝材の性能を評価することにつながると考えられる。

本研究では、再冠水期間の緩衝材の挙動についての検討をするにあたり、緩衝材の施工により緩衝材の乾燥密度に影響を及ぼす項目（影響因子）、及び影響因子によって誘導される再冠水時の現象を抽出した。影響因子としては、

- ・ 隙間の有無、位置
- ・ 密度分布の程度、方向
- ・ 初期透水性（施工直後の間隙分布）

を考えた。

これらの影響因子に影響を受ける現象として、

○地下水浸潤挙動

- ・ 浸潤速度
- ・ 密度の均質化
- ・ 浸潤による間隙空気の移行

○化学変質

○緩衝材の流出

を抽出し、これらの現象に着目した研究を実施した。これらの現象は再冠水時に相互に影響しており、それぞれの現象において境界値を与え合うものである。（図 1.3.2-1 参照）これらの現象を個別に把握し、できるだけ単純な系での試験を行うことにより、再冠水後の緩衝材を評価するための解析的評価手法を構築することを目標として、研究を行った。

本検討に関し、原環センターは平成 19 年度から再冠水過程における緩衝材の挙動を室内試験規模で検証することを目的に計画を立案し、20 年度から試験を実施してきた[1]。この挙動は、長期の化学的な挙動に比べて過渡的で比較的短期間に起こる変化だとは言え、室内試験で力学的挙動を検討するためには長期間にわたる試験が必要であり、複合的な挙動であるため、知見は少なかった。そのため、要素となる挙動を抽出し、挙動が定常にいたるまでできるだけ長期の試験を行う方針で、試験を実施した。平成 24 年度までにそれぞれの要素についての試験を計画、実施し、再冠水時の挙動把握に努め、さらに必要な事象については試験装置をスケールアップした試験も行った。定常に至っておらず、モデル化するためにデータが十分ではない試験については継続して行って確証を得ることとした。また、緩衝材の流出現象は、把握すべき重要な課題であることが明らかとなったため、引き続き、現象把握のための試験と工学的な対策の効果についての検討を行うこととした。

平成 25 年度からの本事業では、長期試験が定常に至るまでの現象把握とその確認のためのデータ取得を行い、試験が定常に至ったものに関しては、力学解析として単純な事象を対象に解析的に再現する検討を開始した。複合的な現象把握やそれらの現象の連成解析による評価については今後の課題である。

また、施工品質、施工方法についての検討も行った。解析的な手法を使った施工や工学的な対策に関する検討と共に、これまで行ってきた再冠水挙動に関する試験の結果を基に、緩衝材の設計値が合理的であるかどうかを判断するため情報について整理し、設計値についての考え方を示す。本検討は今後、緩衝材を設計し、製作、施工する際に有効な情報であり、品質確保のために必要な情報として整理する。

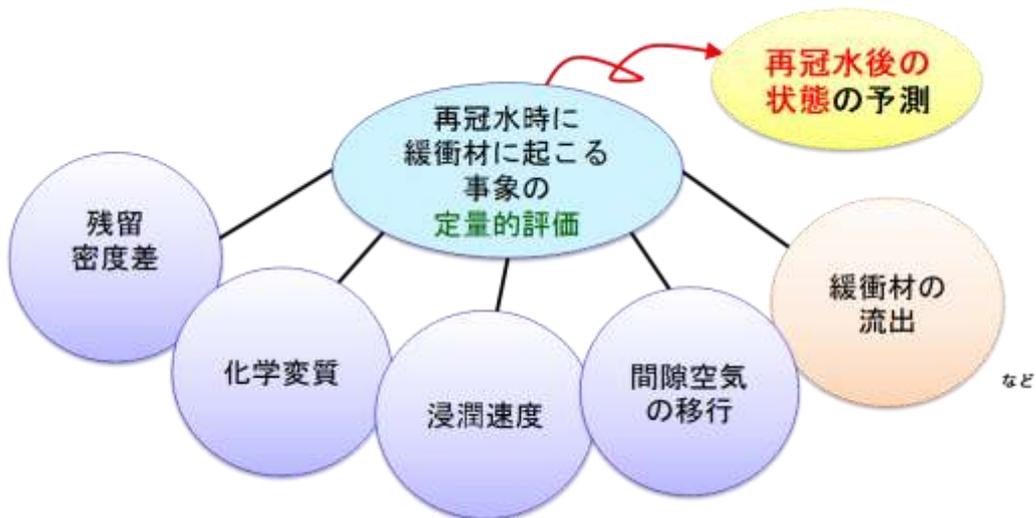


図 1.3.2-1 本業務で対象とした再冠水期間の緩衝材に起こる現象

1.3.3 研究計画と実施内容

5ヶ年の全体計画を表 1.3.3-1 に示す。今年度は、本事業の5年目にあたり、取りまとめを行う。5ヶ年の取りまとめについては、平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業処分システム工学確証技術開発 とりまとめ報告書 第3章人工バリア品質/健全性評価手法の構築—緩衝材を参照されたい。

表 1.3.3-2 に本年度実施した試験項目を示す。今年度は、5ヶ年のフェーズの最終年度にあたるため、長期試験についても昨年度から順次試験を終了し、解体して分析可能なものについての分析を行う。また、今年度までの試験をモデル化したものを対象に解析手法を検討する。この検討は、前項の目的として述べた、冠水後の緩衝材の状態を予測するための評価手法の構築を目的としたものであり、最終的な目標は安全評価の初期状態を示すことである。解析については、成果の到達点を示す。

表 1.3.3-1 全体計画（緩衝材）

	H25	H26	H27	H28	H29
①5年間の全体研究計画立案	計画立案		進捗確認 計画の更新		
②再冠水挙動の調査・検討					
施工品質（密度分布）の均質化試験 （小型・長期試験）	①密度均質化の検討、②応力履歴の検討（蒸留水および0.5MNaCl溶液の場合）				
施工品質が再冠水に及ぼす影響試験 （土槽試験）	①緩衝材ブロックの乾燥密度分布の取得 ②ブロック+ペレット浸潤状況、密度分布		③塩水環境下における土槽試験（ブロック+ペレット） 0.5M NaCl		
緩衝材の品質確認及び品質改善手法の 検討	e-log P曲線の取得：①1.2Mg/m ³ ～2.0Mg/m ³ までの段階圧密試験、 ②液性限界程度での段階圧密試験			③緩衝材膨潤挙動の力学的解釈	
	①Ca型化の発生時期が膨潤挙動に及ぼす影響の取得、 ②一次元浸潤速度試験の継続		③Ca型化の発生時期が膨潤挙動に及ぼす影響の取得（再現性） ④一次元浸潤速度試験（継続→加圧、体積拘束なし）		
	①間隙空気移行に関する調査・検討			②破か圧に影響する緩衝材の変質に関する分析（鉄の影響）	
③緩衝材流出に関する調査・検討					
小規模／工学規模バイピング試験（海水 相当の液種）、限界流速確認試験	①0.5MNaCl溶液の場合のエロージョン量の把握 ②ブロック（流入量、液種）	③0.5MNaCl+0.5/3MCaCl ₂ の場合のエロージョン量の把握 ④ブロック（流入量、液種） ⑤1.8Mg/1.6Mgの限界流速	⑥地下水の場合のエロージョン量の把握 ⑦工学的対策確認試験ブロック+人工不陸 ⑧1.4Mg/1.2Mgの限界流速	⑨工学的対策確認試験 ⑩原位置試験の挙動検証のための試験 ⑪緩衝材流出挙動の限界条件の取得	⑫地下環境の緩衝材流出に関する影響因子に関する試験
地下施設を活用した緩衝材の性能確認	①実地下環境における試験準備	②現況で流入量計測/エロージョン試験の実施	③地下坑道の自然環境における緩衝材流出条件の検討	④地下坑道の自然環境における緩衝材流出条件の検討/工学的対策の効果確認	⑤岩盤の透水性把握/工学的対策の効果確認
地下水流動解析		①地下水位低下工法の効果検討/地下水流動解析	②幌延地下環境のモデル化+工学的対策の効果検討	③処分パネルを想定した止水対策工の効果確認検討	④緩衝材設置後のモデル化による流出挙動を含めた湧水影響の解析
④人工バリア全体としての設計・施工仕様策定の指針の整備					
人工バリア全体の設計・施工仕様の調査・検討（許容エロージョン量の算定方法）	②地下水環境の人工バリア設計・施工仕様に関する調査・検討	③わが国の人工バリア全体の設計・施工仕様の指標範囲の検討		④人工バリア全体の設計・施工仕様の策定に関する調査	④緩衝材設計に関するデータの整理と設計の考え方提示
施工技術の高度化による影響度の低減	①湧水環境における吹き付け施工試験+仮設プラグの効果確認		②湧水環境における吹き付け施工試験解体+エロージョン試験	③緩衝材膨潤時の挙動のモデル化と浸潤挙動の解析	

表 1.3.3-2 今年度の実施項目

報告書の該当箇所	実施項目	実施内容
1. 地下水浸潤		
2.1	緩衝材への地下水浸潤状況の評価	浸潤速度の測定。密度一定条件での給水圧を上昇させた試験と体積拘束しない場合の膨潤変形と浸潤挙動の把握
2.2	密度、応力履歴が異なる供試体を用いた密度均質化試験	初期密度分布の影響確認試験。試験終了後、解体分析
2. 緩衝材の化学変質		
3.1	Ca型化する時期が膨潤挙動に及ぼす影響	Ca型化の起こる時期、及び順序の力学特性に及ぼす影響の把握
3.2	鉄による緩衝材変質挙動の把握	オーバパックの腐食試験、緩衝材の施工の高度化試験によって得られた鉄と接触したベントナイトの分析
3. 緩衝材流出		
5.1	緩衝材流出に関する室内試験	ケイ砂の含有率を変えた流出試験、高水圧下での緩衝材流出現象の定量評価、緩衝材が亀裂に流出する挙動把握
5.2	地下研究施設における流出試験	岩盤の水理特性の取得と定置後、プレ膨潤させた場合の緩衝材の流出抑制に対する有効性の確認
4. モデル化・解析に係る検討		
6.1	緩衝材施工品質に関する解析的検討	緩衝材の施工・工学的対策の処分坑道および処分孔の湧水量への影響評価のための水理解析の適用性検討
6.2	緩衝材の挙動に係る力学解析手法の検討	緩衝材挙動の力学解析のための手法の高度化（構成モデルの高度化）：DACSTAR
6.3	緩衝材の浸潤に関する解析手法の適応性の検討	一次元での緩衝材の浸潤挙動に関する解析手法の適応性の検討と解析による熱の影響の評価：COMSOL
5. モデル化・解析に係る検討		
7.1	緩衝材の設計に関する検討	これまでに得られた知見を基にした緩衝材の設計への反映事項の整理

第 1 章 参考文献

- [1] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 1 分冊）
－遠隔操作技術高度化開発－（2008）.
- [2] （公財）原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書（6 ヶ年のとりまとめ）（2013）.

第2章 緩衝材への地下水浸潤に関わる調査

2.1 緩衝材への地下水浸潤状況の評価

2.1.1 長尺ベントナイト供試体を用いた一次元浸潤速度取得試験（密度一定条件）

(1) 試験の目的

ベントナイト系人工バリア材料は不飽和締固め膨潤性粘性土である。このような材料に水が浸潤する場合の不飽和領域と飽和領域の境界線である浸潤フロントの移動速度を推定することは、非常に難しい。これは、浸潤に伴う飽和度の変化でベントナイトの土骨格構造が変化するためである。一方で、この浸潤フロントの移動速度を取得することは、再冠水終了までにかかる時間を予測するために必要であり、浸潤によって起こる膨潤挙動の進行、飽和度が進むことによる緩衝材の強度の変化、緩衝材内で化学変化が開始される時期等を推定する上で非常に重要である。そこで本検討では、一次元が成り立つと考えられる簡単な境界条件において、蒸留水と海水相当のイオン強度の NaCl 水溶液が緩衝材に浸潤する際の浸潤フロントの移動速度を取得することを目的とする。

(2) 試験方法

使用した試験機を図 2.1.1-1 に示す。設定した試験条件は以下のとおりである。

- ▶ 供試体内に間隙の空気がトラップされないように、一方向、一次元に浸潤させる。
- ▶ 注水はフローポンプで行い、排水は集水瓶で集めイオン分析する。
- ▶ フローポンプによる注水は圧力一定となるように流量を制御する。
- ▶ 注入する液体は、イオン交換水とイオン強度 0.5mol/l の NaCl 水溶液（以下、0.5M NaCl と記す）である。
- ▶ 浸潤フロントの計測は、比抵抗の変化によって計測する。

平成 28 年度からは、飽和フロントに対する通水圧の影響を評価するために、

- ▶ フローポンプにより給水圧を段階的に増加（最大 1MPa 程度）した。

以上の条件をまとめて表 2.1.1-1 に示す。

浸潤の計測については、別途、比抵抗値と飽和度の関係を取得し[1]、得られた関係式から飽和度を算出した。本検討では、比抵抗値と飽和度の関係の近似式として、Archie 式の関数形を踏まえて、試験結果のフィッティング関数を用いている。

$$R = a \left(\frac{\rho_d / \rho_w}{S_r} \right)^{2.2} = a \left(\frac{G_s}{S_r (1+e)} \right)^{2.2} \quad (\text{式 2-1})$$

ただし、 ρ_d は乾燥密度、 ρ_w は間隙液の単位体積質量、 s_r ($\times 100\%$) は飽和度、 e は間隙比、 G_s は土粒子比重である。さらに、 $a(\Omega m)$ は液種の違いによる補正係数であり、試験結果に対するフィ

フィッティングからケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイトで間隙水が蒸留水の場合は 1.0、0.5M NaCl の場合 0.6 である。図 2.1.1-2 にケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイトで間隙水として蒸留水と 0.5M NaCl を用いた場合の飽和度と比抵抗の関係取得試験結果に (式 2-1) を用いてフィッティングした結果を示す。

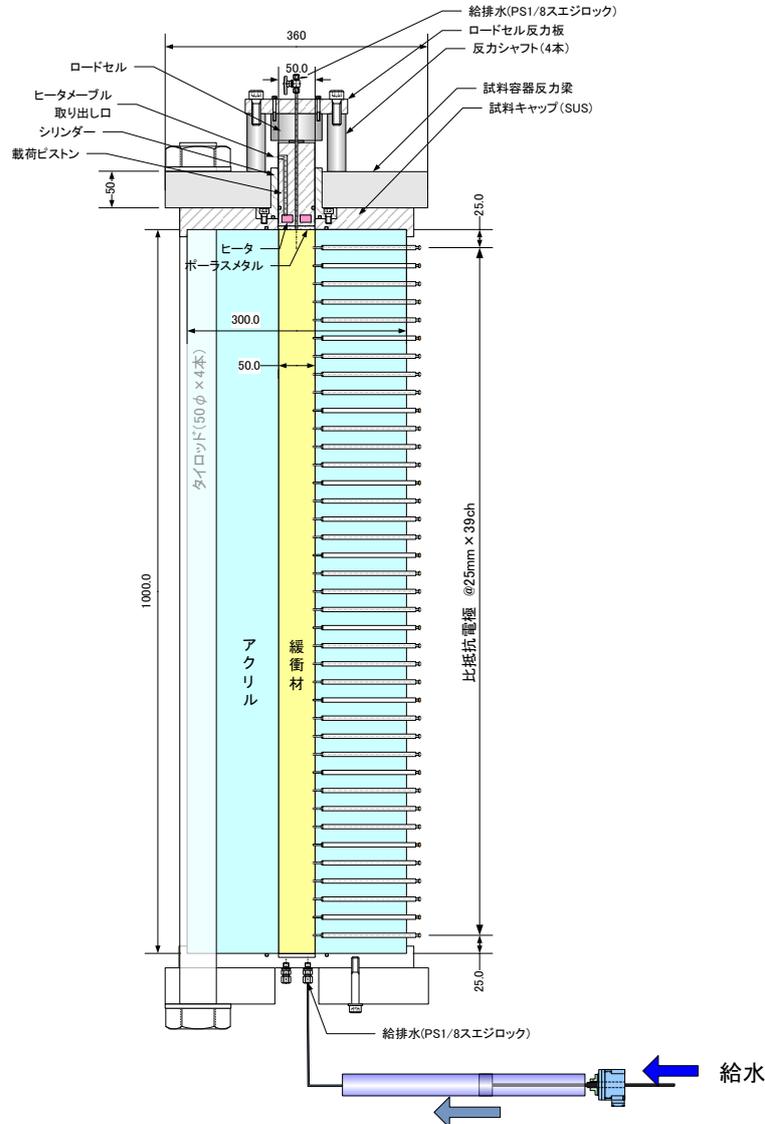


図 2.1.1-1 一次元浸潤速度取得試験装置の概要

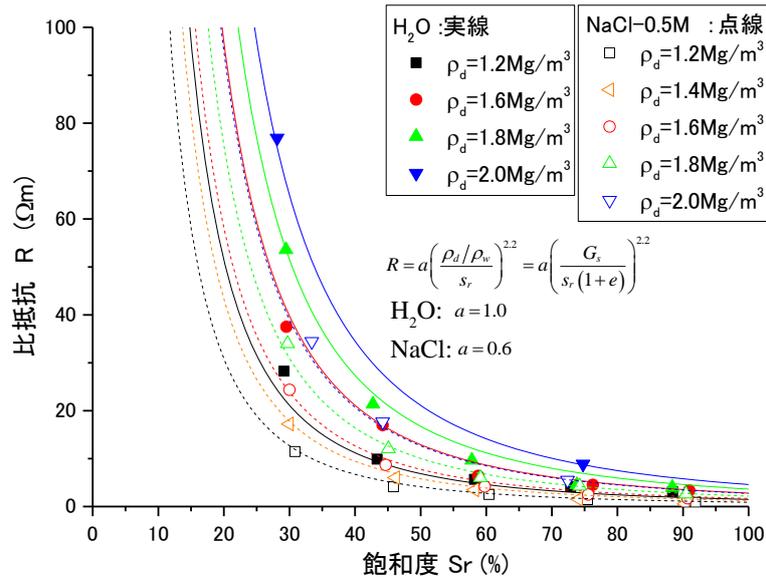


図 2.1.1-2 飽和度と比抵抗の関係（ケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイト）

表 2.1.1-1 長尺ベントナイト供試体を用いた一次元浸潤速度取得試験のケース

試験ケース*	ベントナイト乾燥密度	初期含水比(%)	液種	計測項目	H28 年度から
1	1.6Mg/m ³ (Na 型ケイ砂 30wt%混合)	10	蒸留水	注水量・注水圧 比抵抗（浸潤速度） 試験後：含水比、密度計測	1MPa 程度まで給水 圧を増加
2			0.5M NaCl		

供試体は仕上がり層厚 5mm となるように撒き出しと静的締固めを繰り返して作製した[1]。この供試体作製の際には、アクリル製セルに比抵抗計測用の電極を設置した状態で直接、静的締固めを実施した。このようにすることによって、アクリルセルと供試体の界面が水みちになること、供試体と電極の接触不良となることを防いだ。締固め終わった供試体に頂部にヒーター付きピストンを設置し、膨潤圧を測定できる試験機とした（図 2.1.1-3）。

注水方法はフローポンプによって圧力一定となるように流量を制御することを基本としたが、試験初期に通水圧によってアクリルセルが変形し、供試体との界面が水みちになることを防ぐために、試験当初は流量制御である程度供試体を膨潤させておいて、その後、圧力制御に切り替えた。



図 2.1.1-3 締固め終了後の試験機

(3) 試験結果

(式 2-1) のベントナイトの飽和度と比抵抗の関係式を用いて比抵抗値を飽和度に換算し、飽和度の変化としたものを図 2.1.1-4 に示す。図から、浸潤液として蒸留水を用いた場合と 0.5M NaCl を用いた場合の違いが顕著であることがわかる。この差に関しては、図 2.1.1-2 に示したように、ベントナイトの飽和度と比抵抗関係の非線形性が強く、低飽和度領域では比飽和度の変化に対して比抵抗の変化が敏感であるため、低飽和度領域での差が協調されていることに注意が必要である。また、飽和度分布から、蒸留水の場合、浸潤した水の多くが毛細管現象により供試体上部に拡散し飽和度の遷移領域を形成しているが、0.5M NaCl の場合、遷移領域があまり形成されていないことが分かった。これは、0.5M NaCl の場合、モンモリロナイトの膨潤度が蒸留水の場合に比べて小さく、外間隙が大きいため毛管力が相対的に小さいためであると考えられる。なお、0.5M NaCl のケースで初期飽和度が 39%ではなく、31%となっているのは、供試体作製時の含水比調整を蒸留水で行っているが、(式 2-1) の補正係数は 0.6 と固定しているためである。実際には、供試体作製時の間隙水と供給された 0.5M NaCl が混合しながら浸潤するため、(式 2-1) の補正係数が経時変化するものと考えられる。

さらに、給水を開始してから 6 年と 9 か月半後 (平成 28 年) に、浸潤速度式が取得できたと判断し、地下での水圧が高い状態を模擬した場合を想定して、通水圧を蒸留水のケースで 1MPa、0.5M NaCl のケースで 0.6MPa まで上昇させた。0.5M NaCl を浸潤させる場合には、水圧によって破過しやすいことを考慮して、蒸留水より低い水圧に設定した。図 2.1.1-4 には通水圧を増加させた後の経時変化も併せて示している。図から、蒸留水のケースでは通水圧を増加させた影響が顕著に表れていないが、0.5M NaCl のケースでは、水圧が低いにも関わらず、急激に遷移領域が小さくなっていることが分かる。

図 2.1.1-4 の 0.5M NaCl の場合には、供試体底面から 400mm 付近で飽和度の逆転現象が発生していた。目視観察では、供試体の当該箇所付近が他の部分に比べて異なるなどの状況は確認できなかった。浸潤が進行して、電極が他の金属部品と間隙液を介して回路を形成したなどの可能性が考えられる。

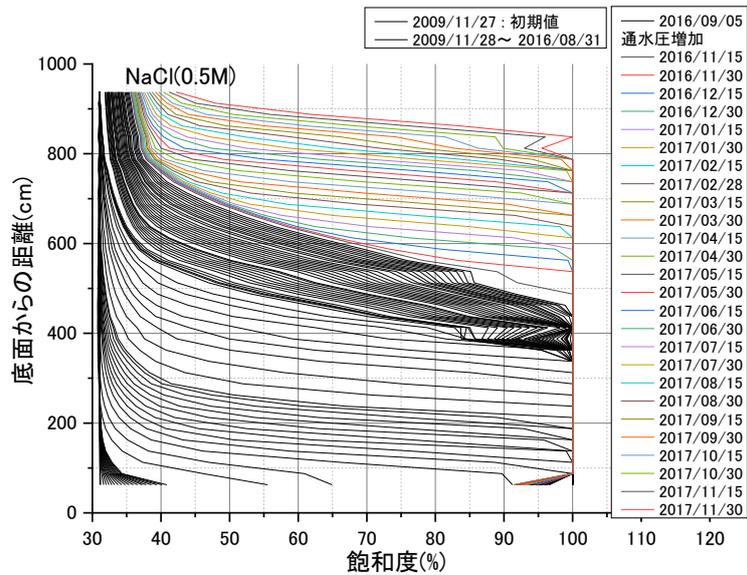
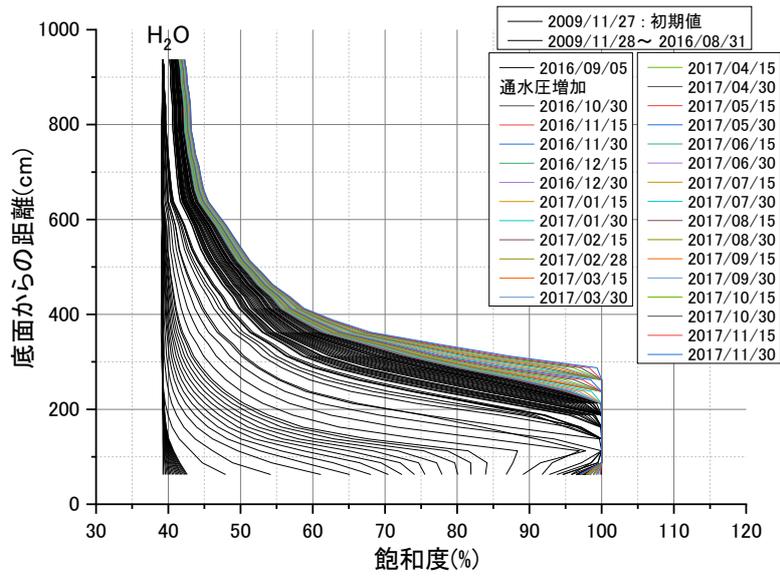


図 2.1.1-4 浸潤に伴う飽和度の変化
(上：蒸留水、下：NaCl 水溶液 (0.5M))

図 2.1.1-5 には、図 2.1.1-4 に示した飽和度分布に基づき、飽和度が初期値から 1%増加した時点で浸潤フロントが到達したと見なした場合の浸潤フロントの進展状況を示す。比抵抗計測のための電極が 50mm 間隔で設置されているため、浸潤フロントの進展状況も階段状になっている。

蒸留水のケースの場合、浸潤フロントの位置 $d(\text{mm})$ は、給水時間 $t(\text{day})$ の指数関数として

$$d = 60t^{0.35} \quad (\text{式 2-2})$$

と近似できる。この関係式に基づいて浸潤フロントが供試体上部(浸潤距離 1000mm)まで到達する時間を算出すると、約 8.5 年となる。この結果は、浸潤フロント位置 $d(\text{mm})$ が給水時間 $t(\text{day})$ の

平方根に比例するという毛細管現象による水の拡散速度の理論式である Washburn 式(図 2.1.1-5 の破線)、

$$d = c \times t^{0.5} \quad (\text{式 2-3})$$

よりも緩慢であった。 c は濡れ角などの関数で表される材料と液種によって決まる係数である。この理論式と実測値を比較すると、浸潤フロントが 650mm 以下では実測値と理論式は良く整合するが、650mm 以上では、理論式に比べ実測位置が徐々に遅くなる傾向を示している。これは、浸潤に伴うモンモリロナイトの基底間隔の変化によって、間隙構造が徐々に変化したためではないかと考えられる。さらに、初期飽和度から飽和度が 1%増加した時点浸潤フロントと定義したこと、比抵抗値の計測位置が 50 mm 間隔であることなども原因として挙げられる。一方、0.5M NaCl の場合、浸潤フロントの位置 $d(\text{mm})$ と給水時間 $t(\text{day})$ の関係は

$$d = 14t^{0.5} \quad (\text{式 2-4})$$

と近似でき、給水時間 $t(\text{day})$ の平方根に比例するという Washburn 式と整合する結果であるが、浸潤フロントの進展状況は蒸留水の場合よりも遅かった。

さらに、この浸潤フロントに対して給水圧を増加した影響は、蒸留水の場合は観測されていないが、0.5M NaCl の場合は急激に浸潤フロントの移動速度が増加していることが分かる。

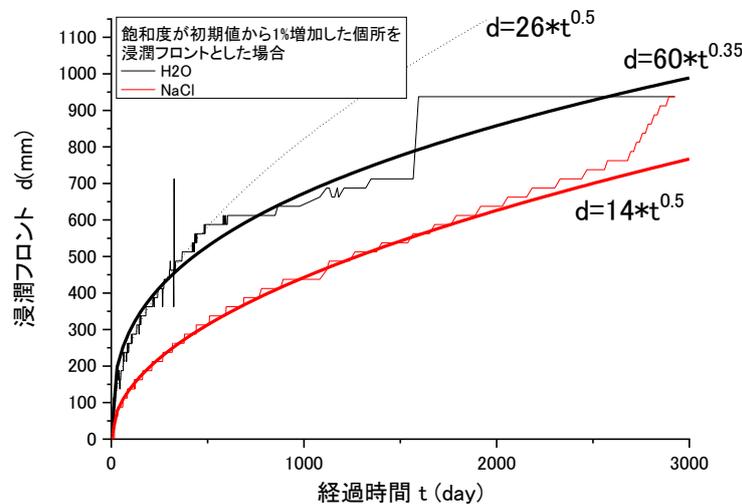


図 2.1.1-5 浸潤フロントの進展状況 (初期飽和度からの増分が 1%で定義)

次に、飽和度が 95%以上となる場所を飽和フロントとした場合の進展状況を図 2.1.1-6 に示す。図から、飽和フロントの進展は、蒸留水の場合に比べ 0.5M NaCl の場合の方が速く、浸潤フロントの進展とは逆転していることが分かる。このことから、蒸留水の場合、ベントナイトに供給された水は、比較的速やかに供試体上部に拡散するため浸潤フロントは移動するが、0.5M NaCl の場合では供給された NaCl 水溶液はあまり供試体内部に拡散されずに給水側に留まっているもの

と考えられる。これは、0.5M NaCl の場合、そのイオン強度の影響でモンモリロナイトが凝集し、毛細管現象に寄与する微小な空隙が形成され難いためと考えられる。

さらに、この飽和フロントに対して給水圧を増加した影響は、蒸留水の場合では、わずかながら飽和フロントの移動速度の増加がみられ、0.5M NaCl のケースでは、飽和フロントの急激な増加がみられた。

なお、送水圧を増加する前の近似式から飽和フロントが供試体上部(浸潤距離 1000mm)まで到達する時間を計算すると、蒸留水の場合で約 135 年、NaCl 水溶液の場合で約 27 年となった。計測値は原点を通過していないが、この近似曲線は原点を通過する関数を選択した。これは、飽和フロントが比抵抗電極まで到達する時間まで計測値として取得されないが、実際には試験開始から飽和フロントが底面から徐々に上昇することに鑑みたためである。

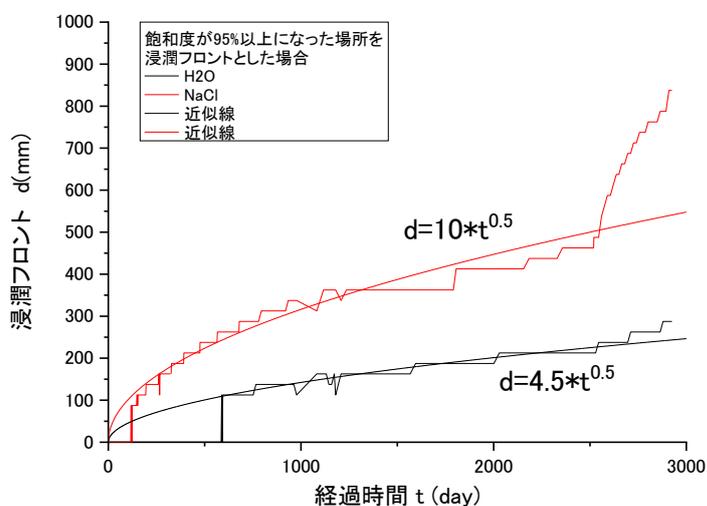


図 2.1.1-6 飽和フロントの進展状況 (飽和度 95%以上で定義)

図 2.1.1-7 には、図 2.1.1-5 と図 2.1.1-6 に示した浸潤フロントの結果から、飽和度が初期値から 1%増加した地点から飽和度が 95%を超える地点を飽和度の遷移領域として示している。図に示すように、飽和度の遷移領域は NaCl の方が短く、蒸留水の方が長いことが分かる。このため、給水した際に、NaCl の方が、高飽和度領域が供試体下部にある厚さで存在することになる。蒸留水を給水した場合には、供給水が供試体上部に吸い上げられるために遷移領域が長くなり、高飽和度領域の厚さは小さくなると思われる。

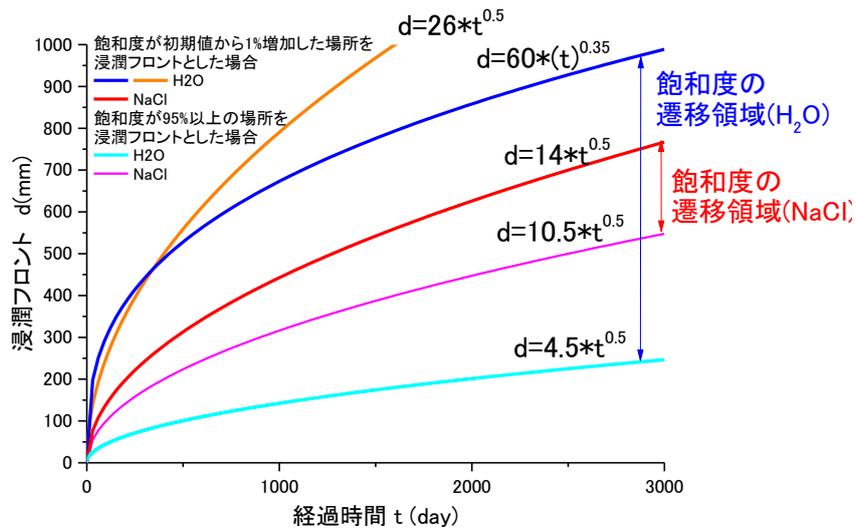


図 2.1.1-7 飽和度の遷移領域

図 2.1.1-8 には、全ケースの浸潤・飽和フロントの経時変化を併せて示している。図から、蒸留水のケースでは、浸潤フロントの位置は送水圧の加圧の影響を受けていないが、飽和フロントが加圧の影響により若干進展していることから、飽和度の遷移領域が増加している。一方、NaCl 水溶液のケースでは、加圧の影響により、浸潤フロントと飽和フロントの両方が急激に増加していることが分かる。また、浸潤フロントに比べ飽和フロントの変化が時間的に早く発生しており、通水圧の増加に伴い、急激に飽和度の遷移領域が縮小していることが分かる。

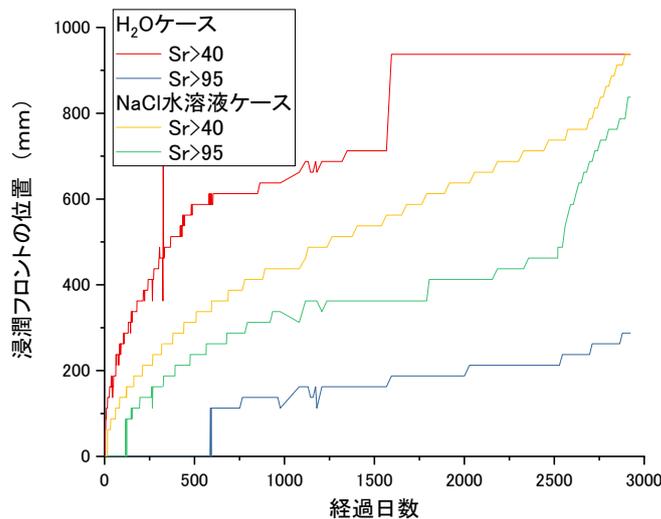


図 2.1.1-8 飽和フロントの進展状況

図 2.1.1-9 には、給水量を間隙面積で除して算出した注水距離を示す。フローポンプによって流量制御で給水していた試験当初は、ほぼ一定速度で浸潤している。圧力制御に変更した後は、図 2.1.1-7 と同様に徐々に浸透し難くなっていることが分かる。なお、図 2.1.1-9 と図 2.1.1-7 で

は浸潤フロントの距離が異なるが、これは図 2.1.1-7 が飽和度の遷移領域を含んだ浸潤のフロントであるのに対して、図 2.1.1-9 は供試体下面から遷移領域を考慮しない浸潤フロントであるためである。実際の飽和領域はフロントの位置よりも飽和度の遷移領域に消費される（毛細管現象で吸い上げられた）水分の分だけ小さいと考えられる。

この浸潤面到達距離に関しては、給水圧を増加したため、給水量が増加したことにより両方のケースで到達距離が増加している。特に、0.5M NaCl のケースで到達距離が増加が激しく、計算上は既に浸潤面が供試体上面に達して、さらに排水が発生することになる。しかしながら、実際には、0.5M NaCl のケースの排水経路にも未だ排水は確認されていない。これは、ポーラスメタルの排水経路中の間隙に排水が留まっている可能性に加え、8 年間に亘る試験期間における経路やセルと拘束盤の隙間などからの蒸発による試験機内の水分の減少の影響の可能性があることによると考えられる。

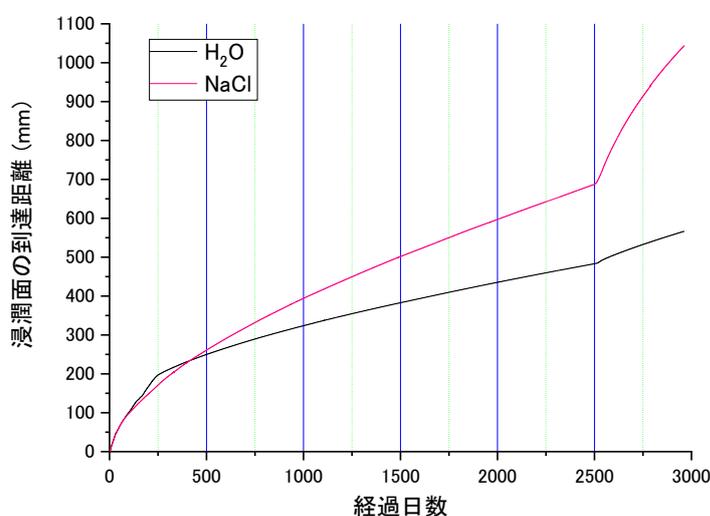


図 2.1.1-9 供給液の浸潤状況

図 2.1.1-10 には、流量制御で注水している最中の通水圧変化を示している。蒸留水の場合（図 2.1.1-10 左）、通水初期は通水圧が負値であるが、通水量が増加するに従って徐々に通水圧が増加した。この通水初期の通水圧の負値は、図 2.1.1-11 に示すように、圧力計と浸潤面の位置の差（水頭差）が 76cm あり、水圧は 7kPa 程度の負値になる。浸潤面が進行すると飽和領域のベントナイトが膨潤して、吸水し難くなることから、徐々に通水圧が上がったものと考えられる。

一方、0.5M NaCl の場合、通水初期からずっと通水圧が負値のままであった。通水圧は-17kPa 程度である。これは、圧力計と浸潤面の位置の差以上の水頭差に相当する。このことから、0.5M NaCl の場合、制御流量よりも供試体の吸水速度の方が大きく、1.7m 程度の水位差に相当する負圧が計測されているものと考えられる。また、NaCl 水溶液が浸潤した領域のベントナイトは、膨潤が抑制される為、浸潤領域の止水性向上の傾向は見られない。そのため、蒸留水の場合に比べて小さな給水圧であるが、供試体に供給された流量は 0.5M NaCl の方が大きい。

さらに、図 2.1.1-10 に示すように、通水開始から 2500 日程度経過後に給水圧を増加させたため、給水量も急激に増加している。本試験で用いた供試体の場合、供試体の初期空隙体積は 485.8cc であり、0.5M NaCl のケースの場合、飽和状態に近づいている。

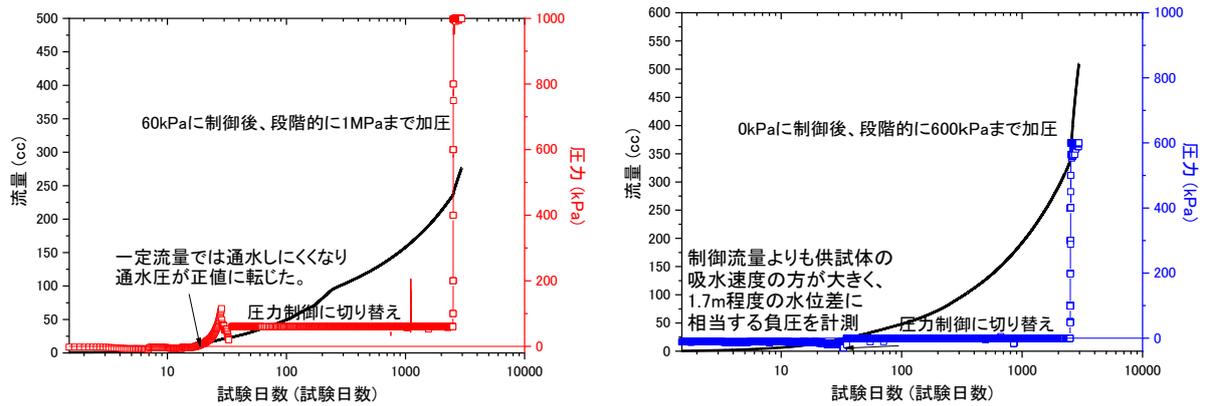


図 2.1.1-10 液体の浸潤状況 (左：蒸留水、右：NaCl 水溶液 (0.5M))

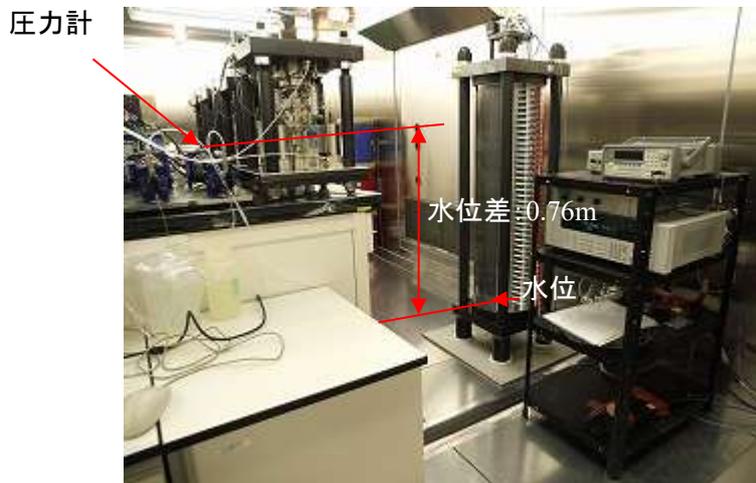


図 2.1.1-11 圧力計と浸潤面の水位差

図 2.1.1-12 には、試験中に計測された軸応力の経時変化を示している。供試体作製時にアクリルセル内で1層当たりの仕上がり層厚 5mm で 200 層締固めて 1000mm の供試体を作製し、軸方向に体積拘束したため、供試体の弾性除荷に伴って、蒸留水で 1.71MPa、0.5M NaCl で 1.38MPa の軸応力が発生している。その後、給水に伴って軸応力が減少しているが、これは給水によるコラプス沈下やセルと供試体間の摩擦の減少などの複合的な作用によるものと考えられる。その後、膨潤圧により軸応力が増加に転じている。蒸留水の軸応力はいまだに増加傾向であるが、0.5M NaCl の軸応力は定常状態となっている。

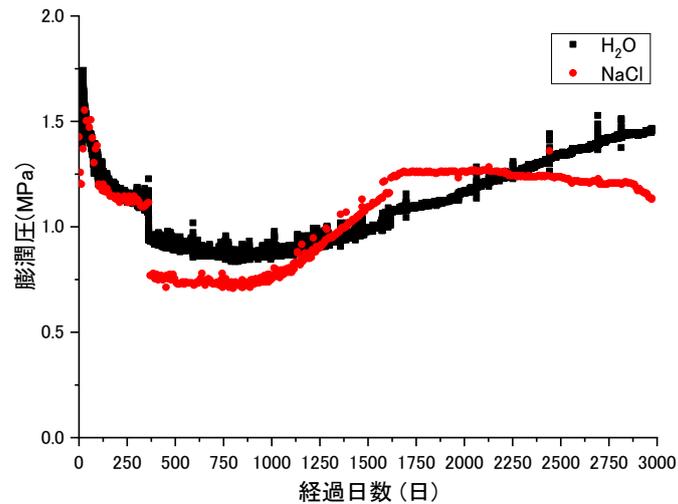


図 2.1.1-12 軸応力の経時変化

2.1.2 長尺ベントナイト供試体を用いた膨潤変形試験

(1) 試験の目的

実際の処分場環境での緩衝材への地下水浸潤は、緩衝材の膨潤変形も伴っているものと考えられる。この膨潤変形に伴って緩衝材の浸潤領域の乾燥密度は低下するため、前述のような乾燥密度一定条件下での浸潤状況とは異なることが予想される。特に、後述するような緩衝材の流出現象が懸念されるような条件では緩衝材の周辺には隙間が存在し、その隙間を緩衝材がシール（膨潤）する過程で流出現象が発生する。この流出現象は、湧水量に比べて湧水が緩衝材に浸潤する速度が小さい場合に発生するものと考えられるため、このような膨潤変形条件下での浸潤速度取得も重要であると考えられる。

そこで本検討では、一次元が成り立つと考えられる簡単な境界条件において、緩衝材の膨潤変形を許容した系での蒸留水が緩衝材に浸潤する際の浸潤フロントの移動速度を取得することを目的としている。さらに本試験では、浸潤に伴う緩衝材の膨潤フロントの計測、さらに膨潤に伴う乾燥密度の分布の変遷も取得する。

(2) 試験方法

表 2.1.2-1 に試験ケースを示す。試験では、図 2.1.2-1 に示した装置を用いて浸潤速度、膨潤速度、乾燥密度分布などを計測する。乾燥密度分布の計測は、定点撮影による変形量や比抵抗値の変化などから評価する。また、変形量の測定が難しい膨潤領域の乾燥密度については飽和度を仮定して比抵抗値から密度分布を計測する。

供試体は、まず、仮締固めモールドで層厚 5.5mm 程度に締固め、出来上がったブロックの辺を油性マジックで縁取り、試験用のアクリルセルに挿入して本締固めを行った。本締固め、密度一定条件下での浸潤速度試験と同様に、仕上がり層厚 5mm となるように行い、60 回繰り返して高さ

30mm の供試体を作製した。その後、比抵抗計測用の電極を設置して供試体上部に給水して試験を開始した。水位はマリOTT管で一定となるようにした[1]。

また、給水方法は供試体上部の 700mm 分を蒸留水で満たし、自由吸水できる条件とした。試験中の膨潤量は、比抵抗値の変化と油性マジックの縁取り箇所の目視で計測することとした[1]。その他の試験条件は、密度一定条件での浸潤速度試験と概ね同様である。

表 2.1.2-1 長尺ベントナイトの膨潤変形取得試験ケース一覧

条件	液種	供試体	給水量	計測項目
膨潤変形条件	H ₂ O	ケイ砂 30wt%混合 Na 型ベントナイト 初期高さ：300 mm 初期乾燥密度：1.6Mg/m ³ 程度	水位一定	比抵抗計測 定点撮影

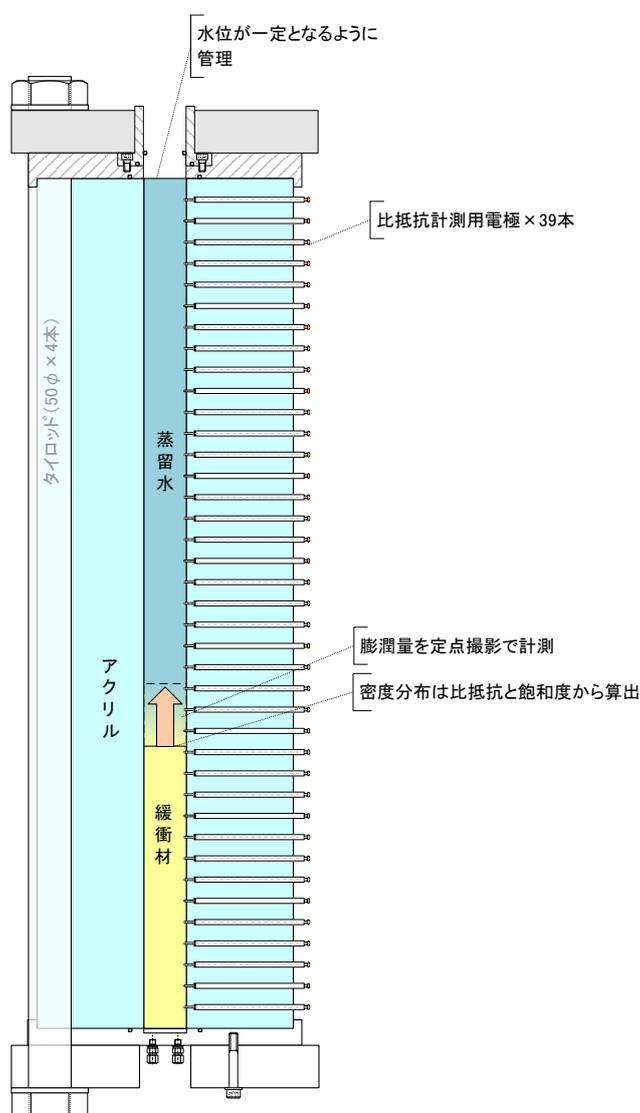


図 2.1.2-1 一次元膨潤変形試験セル

(3) 試験結果

図 2.1.2-2 に膨潤試験状況を示す。図に示すように、試験直後は、水と接している最上部の層が著しく膨潤している。時間が経過するに従って、膨潤する層数が増加し、上部の層から下部の層になる程、膨潤変形量は小さいのが分かる。また、膨潤量が大きな層は、時間が経過しても膨潤量がそれ以上大きくなり、一定となることが分かる。なお、写真表層付近の黄緑色の箇所については、写真撮影のための照明が常時点灯しているために藻が発生したものと考えられるが、詳細については不明である。

図 2.1.2-3 には、層毎の厚さの変化を示す。図から、供試体の膨潤表面から下部の層になる程、膨潤変形量が小さくなるのが分かる。また、膨潤量は、時間経過に対して一定速度ではなく、本試験の場合、試験開始から 210 日から 240 日目にかけて表層が大きく膨潤していた。さらに、直近の 100 日間では、40～55 層目が膨潤しており、表層付近の膨潤量は一定のままであった。これは、表層付近の緩衝材が膨潤して密度が減少するのに伴って膨潤圧も減少し、緩衝材自身の重さと釣り合い状態に達したために膨潤変形が止まったためであると考えられる。

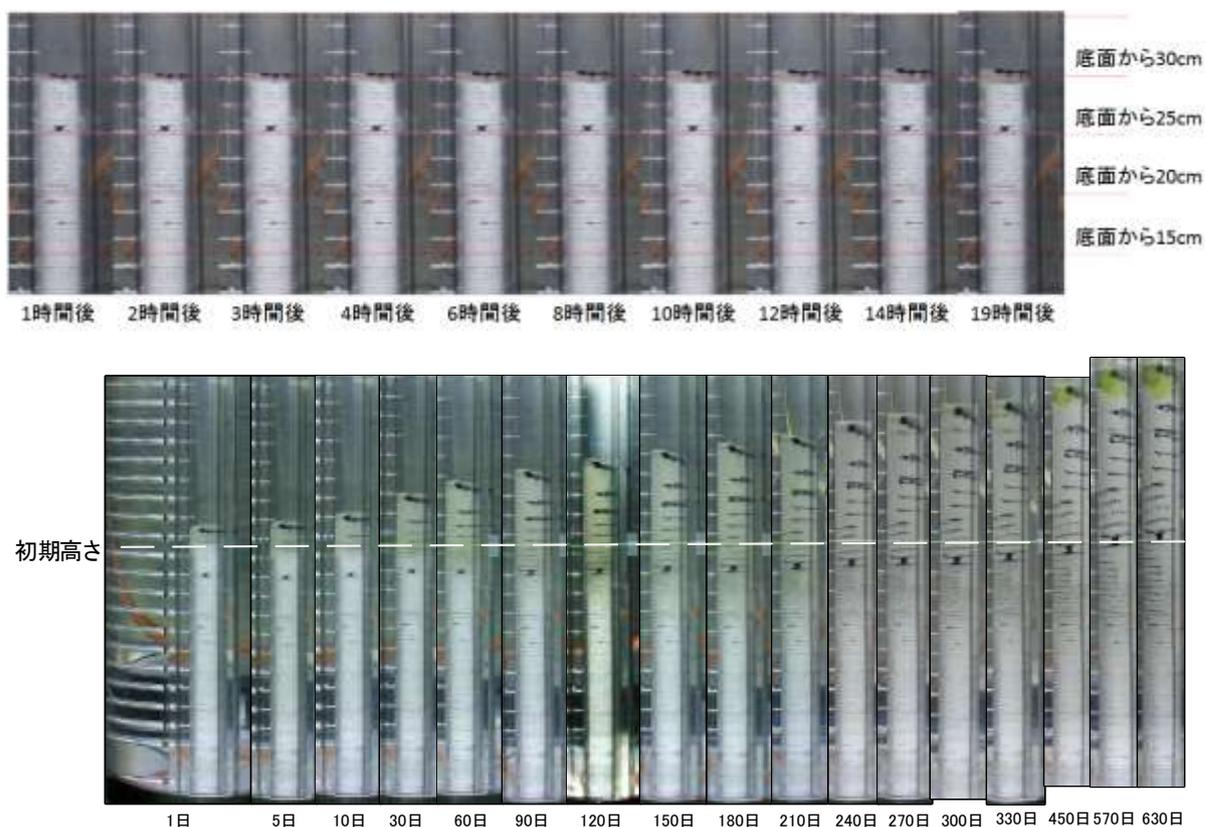


図 2.1.2-2 膨潤変形試験の状況

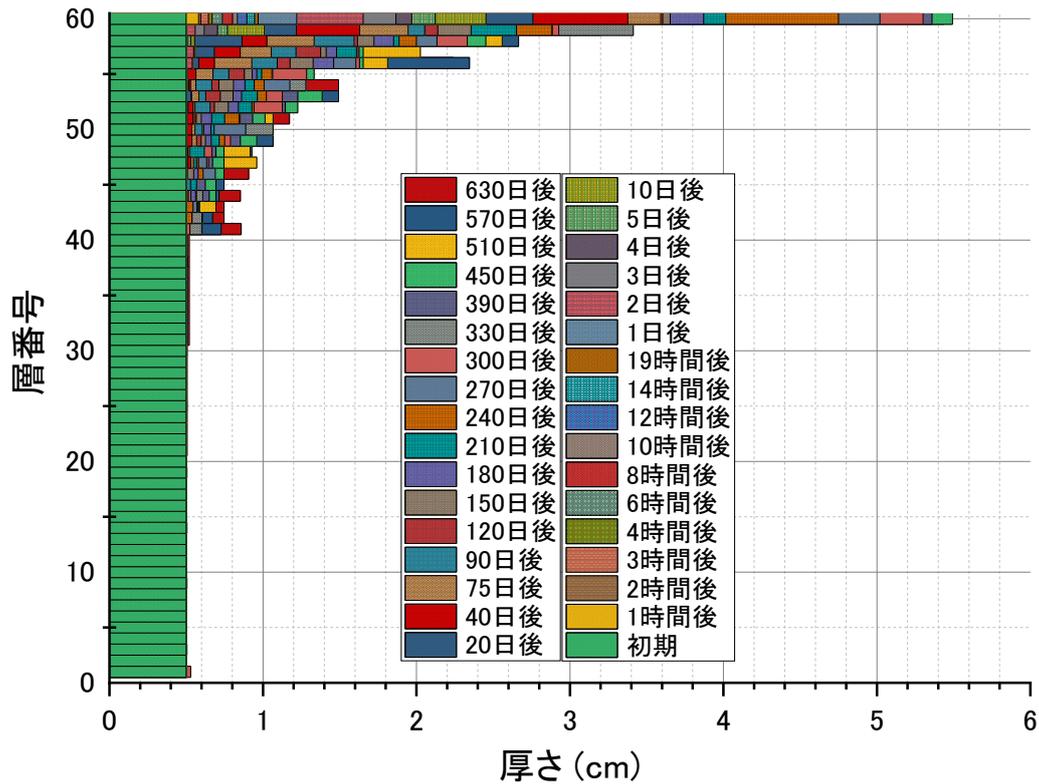


図 2.1.2-3 層ごとの厚さの変化

図 2.1.2-4 には目視観察から得られた密度分布を示す。さらに、図 2.1.2-5 には、図 2.1.2-4 の上部のみの拡大図を示す。図から、表層が膨潤しながら乾燥密度が低下している状況が分かる。

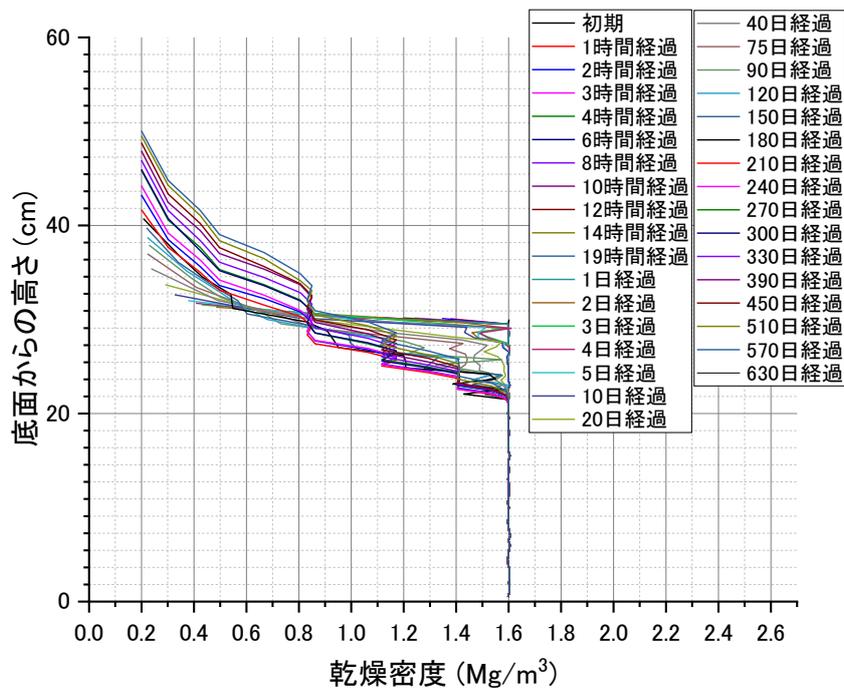


図 2.1.2-4 供試体密度分布 (目視)

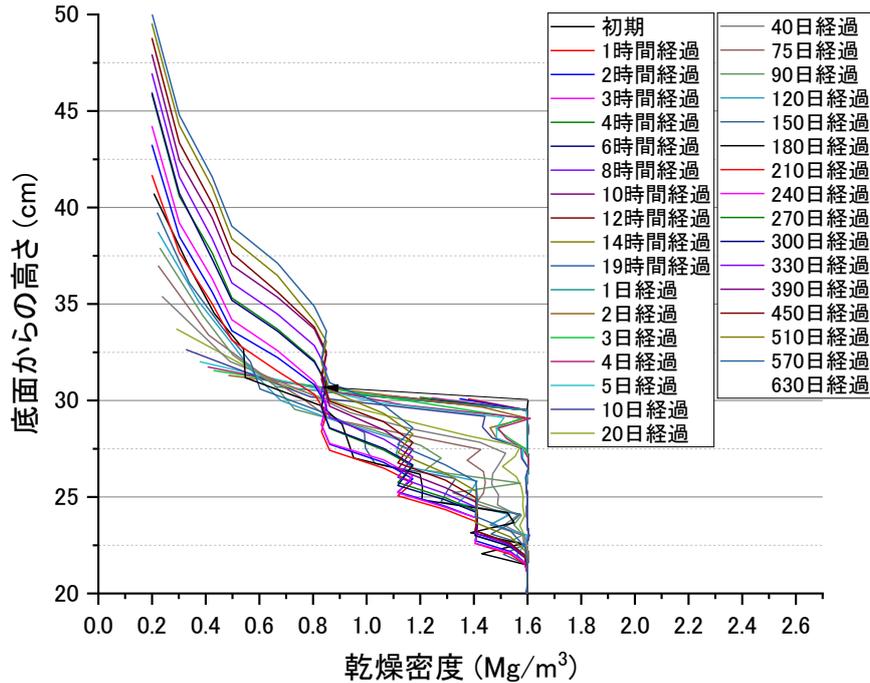


図 2.1.2-5 供試体密度分布 (拡大図)

図 2.1.2-6 には、比抵抗値の分布を示す。図 2.1.2-2 に示したように、上部の比抵抗電極は供試体に触れておらず、水と接触している状態であるが、日によって大きく変動していることが分かる。緩衝材から水溶性の鉱物由来のイオンやモンモリロナイトの層間陽イオンなどの拡散の影響を受けている可能性がある。また、初期高さから膨潤表面までの区間では、比抵抗値が大きく変動している。本検討では、図 2.1.2-7 に示すように 4 極法によって比抵抗値を求めている。そのため、4 つの電極がすべて接している状態でなければ計測することができない。本試験ケースの場合、供試体表面から 37.5mm は、理論上は計測することができない（水と土の比抵抗値が異なる材料の平均値となる）。610 日目の供試体表面は、供試体底面から 500mm であり、供試体と接している最上部の電極位置は供試体底面から 500mm に位置している。ただし、500mm の電極が十分に供試体と接していないと考えられることから、475mm から 37.5mm 下がりの 437.5mm を 610 日の段階で、4 極法で計測可能な位置とすると図中の点線のようにになる。図から、437.5mm であっても比抵抗値にばらつきが見られる。この比抵抗値のばらつきは、供試体上面付近の膨潤が著しく、乾燥密度が非常に小さくなっているために、供試体と電極の不安定な接触状態に起因することが推察できる。

そこで、比抵抗値が安定して取得できている高さ 337.5mm から供試体と電極の接触が不安定な状態となっている表面からの厚さを推定すると、正常に供試体と接触している電極が供試体底面から 375mm の電極であることが分かる。このことから、300 日時点での供した表面である 500mm から 400mm の区間の電極接触は不安定な状態となっている可能性がある。

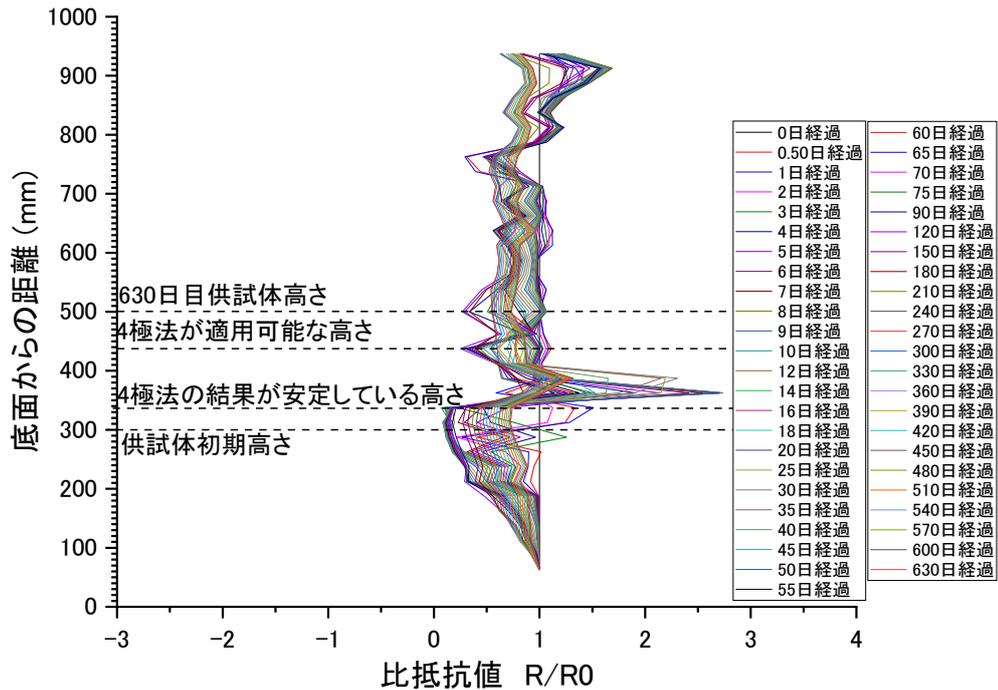


図 2.1.2-6 比抵抗値から算出した飽和度分布

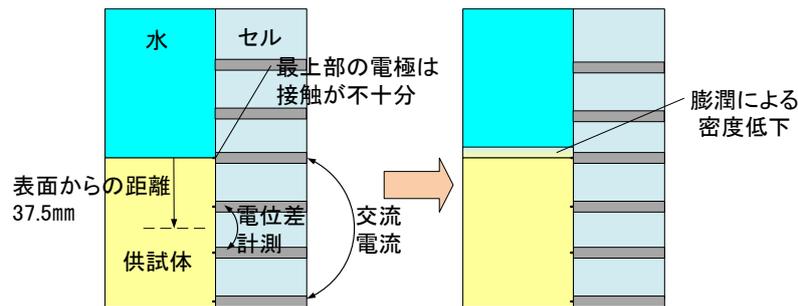


図 2.1.2-7 供試体上面の状況

ここで、図 2.1.2-7 に示すように、供試体初期高さから浸潤フロントまでを「浸潤距離」、供試体初期高さから供試体表面までを「膨潤距離」として、「浸潤距離」と「膨潤距離」を合わせたものを「浸潤厚さ」と呼ぶことにして、密度一定条件の飽和フロント： $d = 4.5\sqrt{t}$ や浸潤フロント $d = 26\sqrt{t}$ と本試験から得られた「浸潤距離」と「浸潤厚さ」の経時変化を図 2.1.1-7 に示す。図には、実験結果として、目視観察結果から得られた「浸潤距離」と「浸潤厚さ」の経時変化と比抵抗計測から得られた「浸潤距離」に目視観察から得られた「膨潤距離」を加えて算出した「浸潤厚さ」を併せて示している。

図から、比抵抗結果から得られた膨潤変形条件での浸潤距離や膨潤厚さは、体積一定条件で得られた浸潤フロントまでの距離と概ね一致していることが分かる。ただし、両者は飽和度が異なると考えられるため、まったく同じ浸潤状態ではない。目視観察結果から得られた浸潤距離は膨潤距離よりも小さくなった。また、膨潤領域が飽和していると仮定して膨潤距離は飽和フロントとして考えると、膨潤距離の進展は、密度一定条件の飽和フロントの進展に類似していた。ただ

し、その速度は密度一定条件よりも速く、給水時間の平方根で近似すると、

$$d = 8\sqrt{t} \quad (\text{式 2-5})$$

となった。このことから、密度一定条件の飽和フロントの概ね倍の速度で膨潤するといえる。但し、本実験における膨潤領域では、供試体表面に向かうほど密度が低下しており、密度一定条件の飽和フロントと単純に比較できないことを考慮しなければならない。

さらに、20日目から610日目まで、浸潤距離は概ね一定であり、浸潤厚さのみが増加傾向であった。このことから、20日目から610日目までは浸潤した水は膨潤変形に消費され、供試体内部にはあまり水が供給されていないと考えられる。

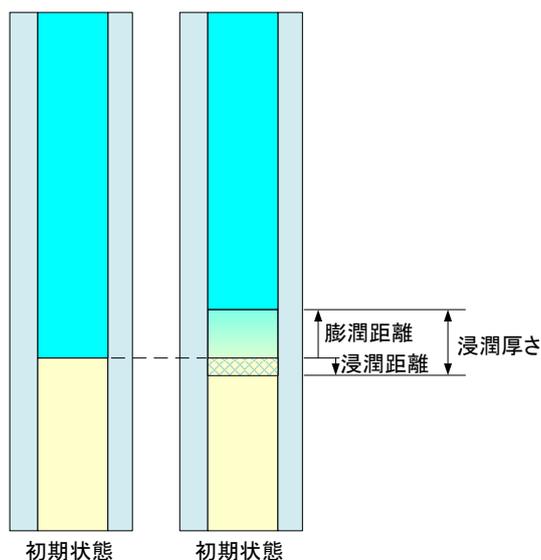


図 2.1.2-8 試験開始前後の供試体上面の状況

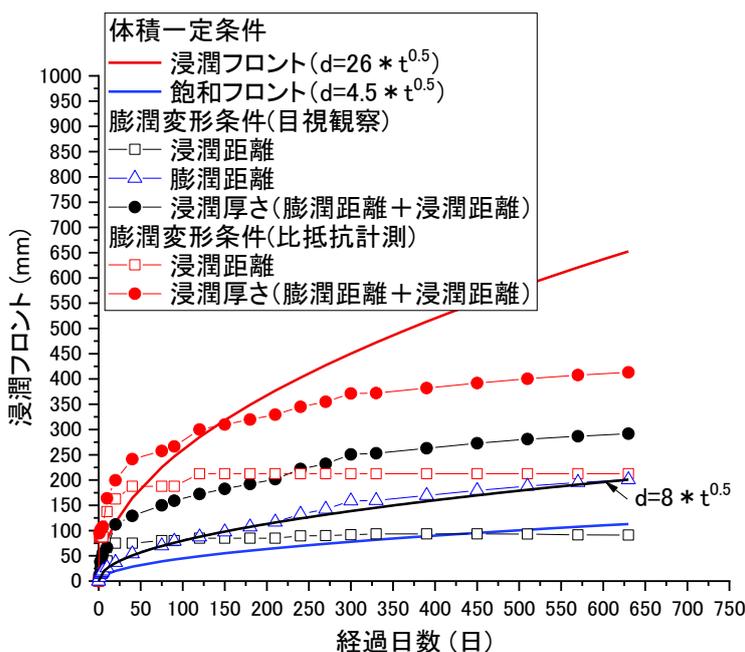


図 2.1.2-9 供試体密度分布

2.1.3 まとめ

本試験の結果によって、ベントナイト系人工バリアへの浸潤速度が取得することができる。再冠水過程における緩衝材の状態の変化は、全て浸潤を引き金として起こる現象であるため、浸潤速度を得ることは再冠水過程を予測するための時間軸の設定となる。この浸潤速度が把握できれば、様々な境界条件を考慮できる解析技術に本試験結果を反映させることによって緩衝材内の飽和過程を予測することができ、それによって、膨潤力の発生の進展状況等にも繋げていくことができると考えられる。また、化学的な変質挙動が施設閉鎖後の何時から始まるのかなども推定できる。

この速度と二次元の浸潤状況の把握することによって浸潤の一次元的な推移を評価していくことができると考えられる。現在の緩衝材の施工方法は、緩衝材と天然バリアの間は隙間、若しくはペレットを充填する方法か、原位置締固めや吹付けのように界面に隙間なく施工出来る方法とが想定されており、施工方法の選択において界面の水理場は施工方法を特徴付けるポイントでもある。本試験では、供試体をアクリルセル内で締固めて作製したため、緩衝材は界面には隙間がない施工方法で構築したものに相当する。言い換えれば最も浸潤し難い施工方法における浸潤速度を取得していることになる。よって、別途実施している土槽試験の試験ケースの実験条件の設定や試験期間の推定などにも本試験結果が反映できる。

本試験結果では、一次元で不飽和状態の緩衝材に蒸留水や NaCl 水溶液を浸潤させた場合、浸潤フロントの進展速度を実験的に取得した。これは、拡散方程式の解が時間の平方根に比例することに概ね整合する結果であり、この試験結果は、従来の不飽和状態の緩衝材の水の浸潤に対して、水分濃度の異なる場の水自身の拡散運動として捉えるやり方の妥当性の裏付けになるものである。この不飽和状態の水の移動は、不飽和状態の化学変質や膨潤挙動評価にも重要な事象であるため、緩衝材の化学、水理、力学挙動を精緻にモデル化するためにも不可欠なものである。

昨年度、本試験をモデルとして解析コード、DACSAR と COMSOL[3]を使って不飽和一次元浸潤解析で再現解析を行った。この結果、試験結果を再現するための情報が得られ、一次元のベンチマーク試験として活用することができた[1]。COMSOL については、連成解析のプラットフォームとすることのできる解析ツールであるため、今後、DACSAR を取り込んだ解析ができる可能性もあり、再冠水期間の挙動予測のために有効なツールだと考えられる。

同一の試験系による膨潤変形試験は、緩衝材が隙間を膨潤によって埋める際の進展についての挙動把握を行った。緩衝材の位置毎の膨潤挙動を得るために工夫を施し、体積拘束せずに膨潤させた場合の挙動を、5mm の層毎に定量性をもって把握することを目的とした。

本試験によって、体積を拘束させない場合には、まず、ごく表面付近が膨潤し、膨潤することにより内部への浸潤が遅くなることがわかった。これは、膨潤する緩衝材の表面に密度が低い部分が生じることを意味する。隙間がうまることにより、内部からの膨潤により、密度は高まることが予測できるが、湧水環境であれば、隙間が埋まる過程の緩衝材密度の低い部分でベントナイトが流出することが容易に予測できる。緩衝材流出現象の裏付けとなる挙動である。流出発生の境界値の検討と合わせて考えることにより、再冠水時の初期に起こる緩衝材の流出の挙動把握を深めることができるため、今後、緩衝材の流出抑制の対策を考える上でも有益なデータとなる。

2.2 施工特性（密度差）が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響

2.2.1 研究の背景と目的

これまで、人工バリアとしての緩衝材についての検討は、建設操業技術と長期性能評価は別々になされてきた。これは建設操業技術と長期性能評価を繋ぐ再冠水時の挙動を定量的に評価できる情報が少なかったこと、長期性能評価が密度分布を考慮できる体系ではなかったこと等から、緩衝材の持つ膨潤性能によって、再冠水中に施工による緩衝材内の密度分布はなくなるという想定がなされ、施工時の特性を考慮しなくてもよいとしたためである。このため、どのような施工法で緩衝材を施工しても、全体の乾燥密度が仕様を満足すれば、施工方法特有の密度分布は考慮されずに、均一な乾燥密度を仮定して性能変化が予測されている。

本検討は、密度分布を有する緩衝材が再冠水によって膨潤し、密度が均一化するかどうか、均一化しなければどの程度の密度分布が残留するのか、さらに平衡膨潤圧と乾燥密度との関係を理論的に説明できるモデル化を行うことを目的としている。

2.2.2 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響

(1) 試験方法

密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響を評価する試験については、図 2.2.2-1 に示すような密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響を取得するための試験機（以下、直列膨潤量試験機）を使用した。試験装置に関して留意した条件は以下のとおりである。

- ▶ 供試体内に間隙の空気がトラップされないように、一方向、一次元に浸潤させる。
- ▶ 注水はシリンジポンプ（フローポンプ）によって行う。
- ▶ 1つの供試体内に密度の異なるブロックを混在させると、その界面の移動の観察が非常に困難となることから、図 2.2.2-1 に示すように密度の異なる均質供試体の膨潤量試験機のピストンを直列に繋ぎ、ピストンの動きを計測することによって界面の膨潤量を計測する。
- ▶ 直列した膨潤量試験機の下側に高密度供試体、上側に低密度供試体をセットする。この際、下側の供試体にはピストンの死荷重が作用するため、ピストンの荷重（3520g）を相殺するカウンタウェイトを配置する（図 2.2.2-2 参照）。

試験ケースを表 2.2.2-1 に示す。試験水として蒸留水を使用したケースと 0.5mol/L の NaCl 水溶液（以下、0.5MNaCl と記す）を使用したケースについて試験した。表中には、() 内にブロック作製時の計画値に対し、製した高密度ブロックとの低乾燥密度ブロックの乾燥密度の実測値を示した。ケース 1~3 とケース 1s~3s は、試験水が異なるだけで、他の試験条件はほぼ同じである。両者を比較することによって、膨潤挙動に対して、間隙水のイオン強度が及ぼす影響も定量評価できる。

この試験によって得られる膨潤量の経時変化は、高密度供試体が膨潤することによって低密度供試体を圧縮し均質化の傾向を示し、膨潤圧が釣合うまで変化が続くはずである。よって本試験

は変化が定常に至るまで行い、この内部膨潤量の経時変化からベントナイトの密度が均質化するのに要する時間を取得するのではなく、膨潤圧が釣合うのに要する時間を取得する。

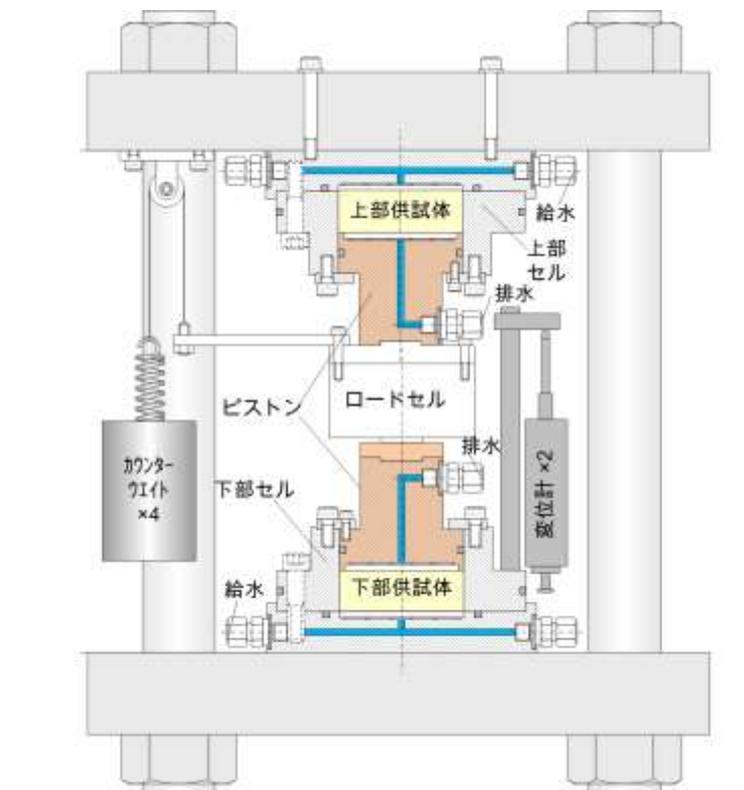
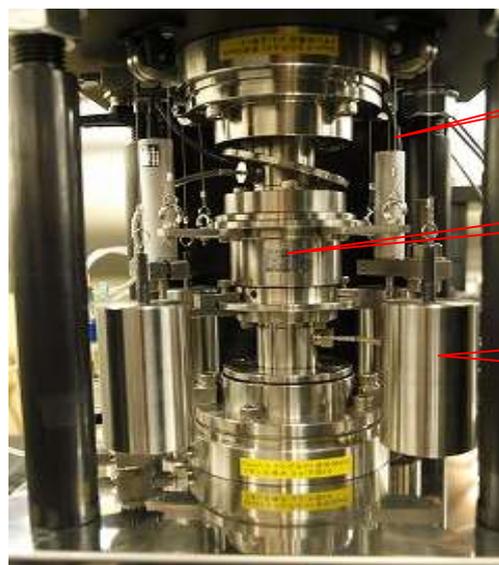


図 2.2.2-1 力学物性（膨潤量）による均質化の判断のイメージ



変位計×2

ロードセル

ピストンの重さを相殺する
カウンターウェイト×4

図 2.2.2-2 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験機

表 2.2.2-1 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験条件

試験 ケース	高乾燥密度 (Mg/m ³)	低乾燥密度 (Mg/m ³)	有効ベントナイト 乾燥密度(Mg/m ³)		初期含水比 (%)		膨潤 方向	平均乾燥密度 (Mg/m ³)	液種
1	1.798 (1.8)	1.399 (1.4)	1.581	1.164	18.97	34.84	鉛直	1.6 (ケイ砂 30wt% 混合 Na 型ベン トナイト)	蒸留水
2	1.984 (2.0)	1.190 (1.2)	1.792	0.963	13.41	46.74			
3	1.698 (1.7)	1.493 (1.5)	1.473	1.258	19.81	27.35			
1s	1.790 (1.8)	1.426 (1.4)	1.573	1.191	19.24	32.06	鉛直	1.6 (ケイ砂 30wt% 混合 Na 型ベン トナイト)	0.5M NaCl
2s	1.991 (2.0)	1.187 (1.2)	1.801	0.960	13.54	47.96			
3s	1.747 (1.7)	1.550 (1.5)	1.526	1.317	18.57	25.55			

()は計画値

昨年度までに、蒸留水のケースである Case1 から Case3 は試験を終了し、解体して分析を行っている。今年度は、0.5M NaCl の Case1s から Case3s の試験を終了し、解体する。

(2) 試験結果 (0.5M NaCl ケース)

1) 膨潤量

図 2.2.2-3 にイオン強度が 0.5M NaCl を用いて実施した直列膨潤量試験で取得した膨潤量の経時変化を示している。図には、前述の蒸留水のケースも比較のために併せて示す。直列膨潤量試験では、2つの供試体のうち、高乾燥密度供試体の乾燥密度の値が大きい程、膨潤量が大きくなると考えられるが、本試験においても蒸留水のケースと 0.5M NaCl のケースのどちらの試験結果もこの考えに整合している。また、イオン強度の影響により、0.5M NaCl の場合の方が、蒸留水のケースに比べ、膨潤量が小さくなっている。ただし、乾燥密度 1.4Mg/m³ と 1.8Mg/m³ の場合は、ここまでの試験では蒸留水のケースより 0.5M NaCl のケースの方が膨潤量が大きい。この原因はわかっていない。

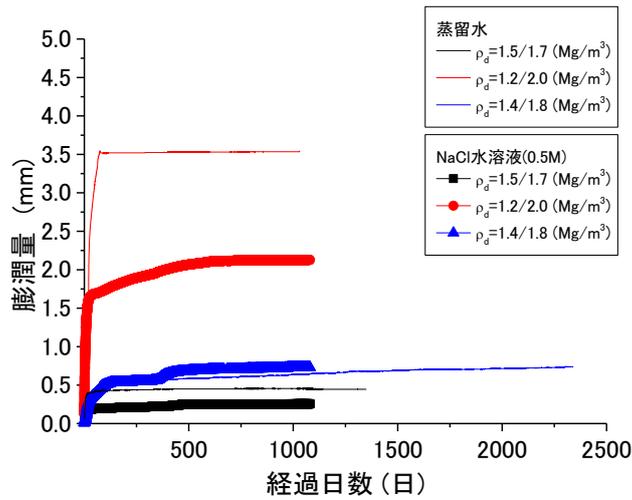


図 2.2.2-3 膨潤量の経時変化(0.5M NaCl 水溶液)

図 2.2.2-4 には、前述の膨潤量から算出した直列膨潤量試験中の 0.5M NaCl のケースの乾燥密度の経時変化を示す。この図にも、前述の蒸留水のケースも比較のために併せて示す。図から、蒸留水のケースに比べて 0.5M NaCl のケースの方が、残留密度差が大きいことが分かった。さらに、初期の密度差が大きいものほど、残留密度差が、大きくなっていった。

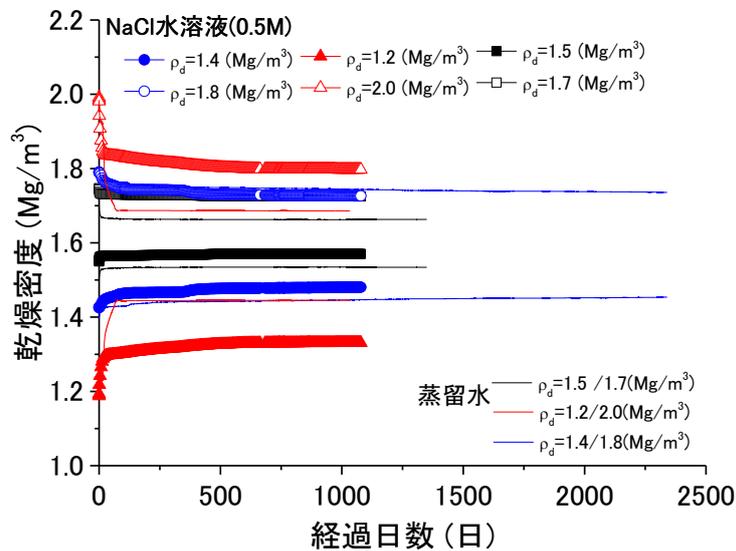


図 2.2.2-4 膨潤に伴う乾燥密度の経時変化(0.5M NaCl 水溶液)

図 2.2.2-5 には、0.5M NaCl の場合の直列膨潤量試験中の膨潤圧の経時変化を示している。この図にも蒸留水のケースを併せて示す。図から、蒸留水のケースに比べ、0.5M NaCl ケースの方が膨潤圧は小さい傾向にあり、イオン強度の影響によるものと考えられる。

直列膨潤量試験の場合の膨潤圧は、2 つある供試体のうち、低乾燥密度供試体の乾燥密度が

大きい程大きくなるものと考えられる。蒸留水と 0.5M NaCl ケースでは、ともに、一時的に逆転現象が発生しているものの、大局的には、この考え方に整合した結果が得られている。

前述の乾燥密度 1.4Mg/m^3 と 1.8Mg/m^3 の場合の蒸留水のケースにおいて、膨潤圧が大きめで、膨潤変形が緩慢であることを膨潤量試験の結果と併せて考えると、乾燥密度 1.4Mg/m^3 セルにおいて、ピストンの傾ぎ、ピストンとセルの摩擦などの影響で、乾燥密度 1.8Mg/m^3 の供試体の膨潤量が乾燥密度 1.4Mg/m^3 の供試体にきちんと伝播されておらず、その反力として、膨潤圧が大きくなった可能性もあると考えられる。また、同様の原因で、乾燥密度 1.4Mg/m^3 と 1.8Mg/m^3 の場合において膨潤量が小さめになっていることも原因として考えられる。

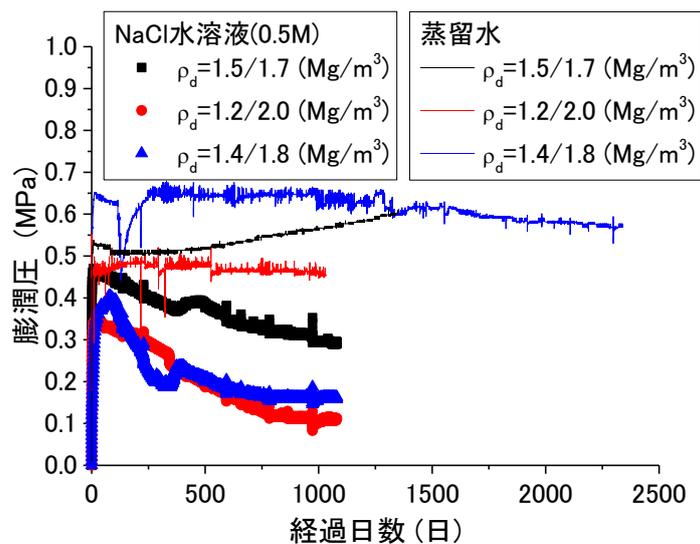


図 2.2.2-5 直列膨潤量試験中の膨潤圧の経時変化(0.5M NaCl)

図 2.2.2-6 には 0.5M NaCl のケースにおける直列膨潤量試験中の給排水量の経時変化を示す。図から、直列膨潤量試験の 2 つの供試体のうち、乾燥密度が大きい供試体の方が、給水量が大きいことが分かる。これは、乾燥密度が大きい供試体は吸水膨潤する（給水した分だけ膨潤する）ためである。一方、乾燥密度が小さい供試体は、直列膨潤量試験では、高乾燥密度供試体の膨潤に伴って圧縮される。しかしながら、この試験では供試体の空隙やセルの隙間などへの給水分が計測されているものと考えられる。また、乾燥密度が 1.2Mg/m^3 と 2.0Mg/m^3 のケースでは、乾燥密度 2.0Mg/m^3 の供試体の膨潤に伴って、乾燥密度 1.2Mg/m^3 の供試体から排水が計測されている。これは、高密度領域の膨潤による低密度領域の圧密といえる。

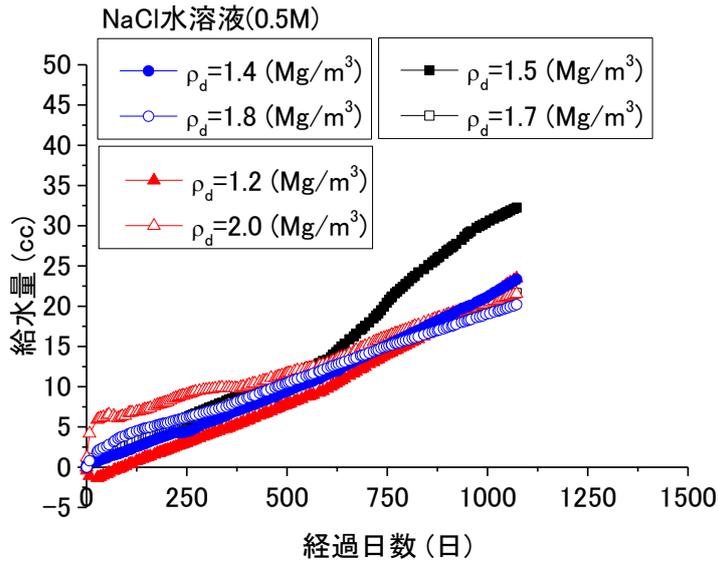


図 2.2.2-6 直列膨潤量試験中の給排水量の経時変化(0.5M NaCl)

2) 供試体の解体後の物理試験の方法

本検討では、試験終了後の供試体の物理試験（密度計測、含水比計測）を実施した。

図 2.2.2-7 に膨潤量供試体の模式図を示す。初期高さ H 、面積 A 、乾燥質量 W の供試体の

かさ乾燥密度 ρ_d とすると、 $\rho_d = \frac{W}{AH}$ で表される。ここで、膨潤変形 d が発生したとすると、

バルクの乾燥密度 ρ_d は $\rho_d = \frac{W}{A(H+d)}$ となる。

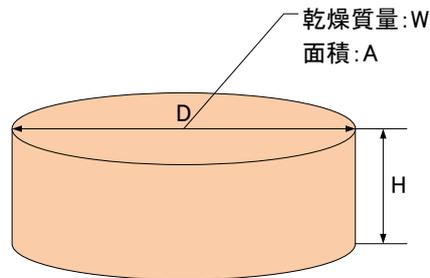


図 2.2.2-7 供試体模式図

ここで、直列膨潤量試験について考える。直列膨潤量試験では、乾燥密度 ρ_{dl} の低密度供試体と乾燥密度 ρ_{dh} の高密度供試体がピストンを介して繋がっているため、高密度供試体に膨潤変形 d が発生したとすると、乾燥密度は

$$\rho_{dh} = \frac{W_H}{A(H+d)} \quad (\text{式 2-6})$$

となる。この時の低密度供試体は、高密度供試体に膨潤変形によって d だけ圧縮される為、その乾燥密度は

$$\rho_{dL} = \frac{W_L}{A(H-d)} \quad (\text{式 2-7})$$

となる。なお、下添え字、 H は高密度供試体、 L は低密度供試体をそれぞれ表している。両供試体の初期形状は同じであり、直径 D 、高さ H 、面積 A である。ここで、両供試体の算術平均乾燥密度 $\bar{\rho}_d$ を、膨潤変形 d を用いて表すと、

$$\bar{\rho}_d = \frac{\rho_{dH} + \rho_{dL}}{2} = \frac{\frac{W_H}{A(H+d)} + \frac{W_L}{A(H-d)}}{2} = \frac{W_H(H-d) + W_L(H+d)}{2A(H-d)(H+d)} \quad (\text{式 2-8})$$

で表される。一方、両供試体を一体として考えて、両供試体の総乾燥質量を両供試体の総体積で除して定義する平均密度 $\hat{\rho}_d$ は、

$$\hat{\rho}_d = \frac{W_H + W_L}{A(H-d) + A(H+d)} = \frac{W_H + W_L}{2AH} \quad (\text{式 2-9})$$

となり、膨潤量に無関係になる。

ここで、蒸留水の Case の乾燥密度 $\rho_{dL} = 1.2 \text{Mg/m}^3$ の低密度供試体と乾燥密度 $\rho_{dH} = 2.0 \text{Mg/m}^3$ で初期供試体高さ 20mm、直径 60mm の場合の膨潤量に対する個々の供試体の乾燥密度と平均乾燥密度の変化を例として図示すると、図 2.2.2-8 のようになる。両供試体の乾燥密度は、それぞれ、正と負の反比例のグラフとなり、算術平均乾燥密度 $\bar{\rho}_d$ も下に凸の関数となっていることが分かる。両者が同じ乾燥密度になるのは乾燥密度が $\bar{\rho}_d = 1.6 \text{Mg/m}^3$ の場合であり、この時に限り $\bar{\rho}_d = \hat{\rho}_d$ となることが分かる。本試験の場合、解体時の膨潤変形量が 2.14mm であったため、高密度供試体の乾燥密度は 1.807Mg/m³ (図中の赤丸) であり、低密度供試体の乾燥密度は 1.344Mg/m³ (図中の青丸) である。図に示したように、低密度供試体と高密度供試体の初期乾燥密度の算術平均値が 1.6Mg/m³ であっても、膨潤量が小さい場合では算術平均値は 1.6Mg/m³ よりも小さくなることが分かる。

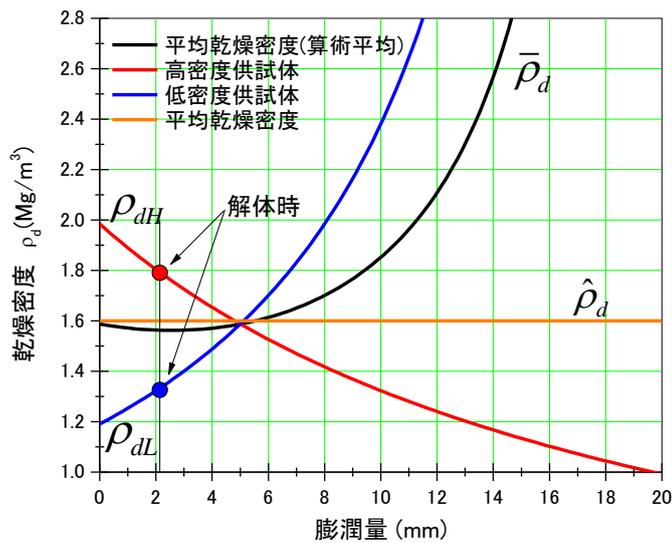


図 2.2.2-8 膨潤量に対する個々の供試体の乾燥密度と平均乾燥密度の変化

3) 乾燥密度 1.5Mg/m³ - 1.7Mg/m³ ケース (Case1s) の解体

図 2.2.2-9 に示した超音波カッターを用いた供試体スライサーを用いて、乾燥密度 1.5Mg/m³ と 1.7Mg/m³ の緩衝材に 0.5M の 0.5M NaCl を注水して実施した直列膨潤量試験後の供試体の解体を実施した。表 2.2.2-2 に供試体作製時の諸元と解体結果を示す。解体結果は図 2.2.2-10 に示した各スライス試料の値の合計値や平均値として算出したものである。結果より、密度の均一化がほとんど進んでいないことが分かる。なお、解体時の含水比は、炉乾燥法で取得しているが、この際に間隙水に溶解している塩が析出して固相として評価されることになる。そのため、この溶解している塩の質量分は液相として、

$$\bar{w} = \frac{w}{(1 - c) - cw}$$

補正している。ただし、 \bar{w} は補正後の含水比、 w は補正前の炉乾燥法で得られた含水比、 c は内割りの塩濃度である。



図 2.2.2-9 供試体スライサー

表 2.2.2-2 直列膨潤量試験の解体結果

		低密度供試体	高密度供試体
供試体作製時	直径 (mm)	60.00	60.00
	高さ (mm)	19.73	19.73
	体積 (cm ³)	55.785	55.785
	湿潤質量 (g)	108.55	115.58
	含水比 (%)	28.18	20.58
	乾燥質量 (g)	84.69	95.85
	湿潤密度 (Mg/m ³)	1.946	2.072
	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.550	1.747
解体結果	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.570	1.725
	含水比※ (%)	29.42	23.05

※間隙水に溶解してる塩を液相として補正

図 2.2.2-10 に乾燥密度分布を示す。本ケースでは、前述の蒸留水を用いた均質化試験の解体において試験後の供試体内に密度分布が存在していたという結果を踏まえて、給水開始と同時に膨潤させていたやり方を改めて、給水飽和中は変形を拘束し、排水の確認をもって十分に飽和したと判断してから膨潤させるという手順にした。しかしながら、試験後の供試体内の密度分布は解消されなかった。本検討で使用した液体が NaCl 水溶液であり、膨潤性能を抑制することに鑑みれば、この試験後の供試体に存在している密度分布は供試体作製時に発生したものであると考えられる。ただし、図中の縦軸が±20mm 付近に存在している給水側の乾燥密度が若干低くなっているのは給水箇所が局所的に膨潤したためだと考えられる。

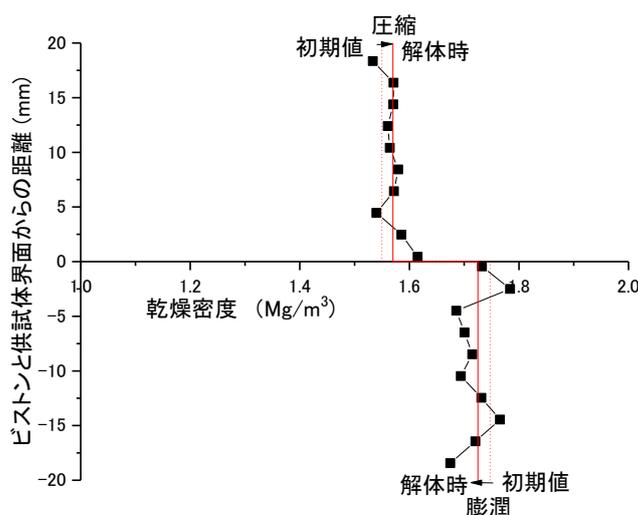


図 2.2.2-10 直列膨潤量試験の乾燥密度分布

4) 乾燥密度 $2.0\text{Mg/m}^3 - 1.2\text{Mg/m}^3$ ケース (Case2s) の解体

Case1s と同様の方法で、乾燥密度 2.0Mg/m^3 と 1.2Mg/m^3 の緩衝材に 0.5M NaCl を作用させて実施した直列膨潤量試験後の供試体の解体を実施した。表 2.2.2-3 に供試体作製時の諸元と解体結果を示す。解体結果は図 2.2.2-11 に示したスライス試料の値の合計値や平均値として算出したものである。解体後の結果より、このケースにおいても密度の均一化がほとんど進んでいないことが分かる。解体時の含水比は Case1s と同様に、塩の質量分を補正している。

図 2.2.2-11 に乾燥密度分布を示す。本ケースでも、給水飽和中は変形を拘束し、排水の確認をもって十分に飽和したと判断してから膨潤させるという手順を採用したが、試験後の供試体内の密度分布は解消されなかった。本検討で使用した液体が NaCl 水溶液であり、膨潤性能を抑制することに鑑みれば、この試験後の供試体に存在している密度分布は供試体作製時に発生したものであると考えられる。ただし、図中の縦軸が±20mm 付近に存在している給水側の乾燥密度が若干低くなっているのは給水箇所が局所的に膨潤したためだと考えられる。

表 2.2.2-3 直列膨潤量試験の解体結果

		低密度供試体	高密度供試体
供試体作製時	直径 (mm)	60.00	60.00
	高さ (mm)	19.88	19.88
	体積 (cm ³)	56.209	56.209
	湿潤質量 (g)	98.74	127.09
	含水比 (%)	46.25	13.11
	乾燥質量 (g)	67.51	112.36
	湿潤密度 (Mg/m ³)	1.757	2.261
	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.187	1.991
解体結果	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.331	1.797
	含水比※ (%)	36.61	16.48

※間隙水に溶解してる塩を液相として補正

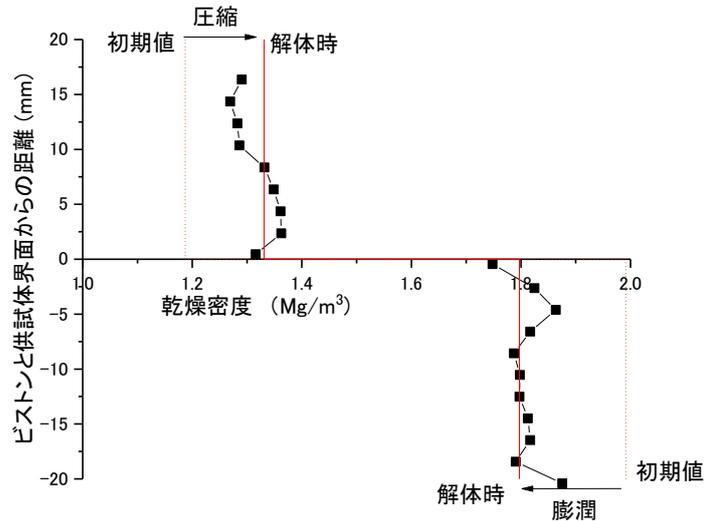


図 2.2.2-11 直列膨潤量試験の乾燥密度分布

5) 乾燥密度 1.8Mg/m³ - 1.4Mg/m³ ケース (Case3s) の解体

上述のケースと同様の方法で、乾燥密度 2.0Mg/m³ と 1.2Mg/m³ の緩衝材に 0.5M NaCl を作用させて実施した直列膨潤量試験後の供試体の解体を実施した。表 2.2.2-4 に供試体作製時の諸元と解体結果を示す。解体結果は図 2.2.2-12 に示すスライス試料の値の合計値や平均値として算出したものである。このケースにおいても、密度の均一化がほとんど進んでいなかった。解体時の含水比は、上述と同様に補正している。

図 2.2.2-12 に乾燥密度分布を示す。本ケースでも、給水飽和中は変形を拘束し、排水の確認をもって十分に飽和したと判断してから膨潤させるという手順を採用したが、試験後の供試体内の密度分布は解消されなかった。

表 2.2.2-4 直列膨潤量試験の解体結果

		低密度供試体	高密度供試体
供試体作製時	直径 (mm)	60.00	60.00
	高さ (mm)	19.75	19.83
	体積 (cm ³)	55.842	56.068
	湿潤質量 (g)	105.14	119.70
	含水比 (%)	31.23	18.66
	乾燥質量 (g)	80.12	100.88
	湿潤密度 (Mg/m ³)	1.883	2.135
	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.426	1.790
解体結果	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.481	1.727
	含水比※ (%)	32.83	19.95

※間隙水に溶解してる塩を液相として補正

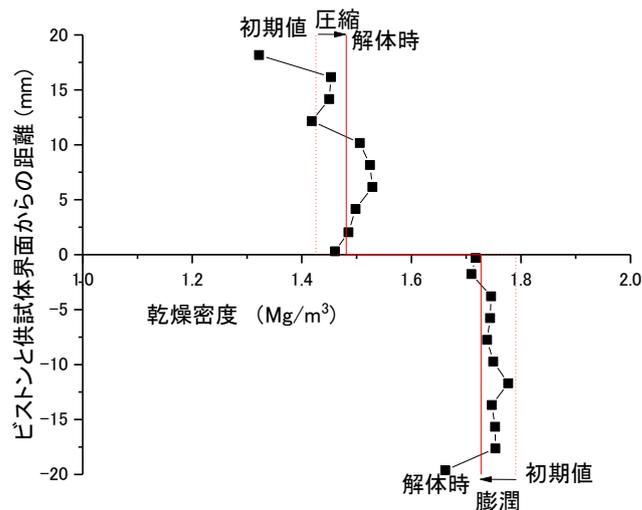


図 2.2.2-12 直列膨潤量試験の乾燥密度分布

2.2.3 応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響

(1) 試験方法

これまでの試験から、密度と膨潤圧は必ずしも一意に対応しない可能性があることを示した。そこで、図 2.2.3-1 に示すように乾燥密度が同じであるが、膨潤による応力履歴が異なる供試体を直列に繋いだ膨潤量試験を実施した。この試験では、直列に繋いだ膨潤圧試験の供試体は密度差が無い場合、密度と膨潤圧が一意に対応するのであれば膨潤変形は生じないはずである。

以下に、試験の方針を示す。

- 供試体内に間隙の空気がトラップされないように、一方向、一次元に浸潤させる。

- ▶ 注水はシリンジポンプ（フローポンプ）によって行う。
- ▶ 先ず、上部供試体（乾燥密度 1.6Mg/m^3 ）と下部供試体（乾燥密度 1.8Mg/m^3 ）を試験機にセットし飽和させる（ 0.5M NaCl の場合は、上部供試体の乾燥密度： 1.7Mg/m^3 ）と下部供試体の乾燥密度： 1.8Mg/m^3 ）。この際、上部供試体は体積拘束条件で密度が一定のままとなるようにして、下部供試体は乾燥密度が 1.8Mg/m^3 から 1.6Mg/m^3 (0.5M NaCl の場合は 1.7Mg/m^3) となるまで膨潤させる。両供試体の飽和後の乾燥密度が同じになったところでピストンを繋いで、直列の膨潤量試験を開始する。ただし、 0.5M NaCl を用いた過圧密供試体と蒸留水を用いた再試験の過圧密供試体 (Case2-2、Case2s、Case3s) に関しては、膨潤時の密度分布の発生を避けるために、十分に飽和させてから膨潤過程に移行することとする。
- ▶ 下側の供試体にはピストンの死荷重が作用するため、ピストンの荷重 (3520g) を相殺するカウンタウェイトを配置する。

試験ケースを表 2.2.3-1 に示す。また、製作した過圧密（高密度）ブロックとの正規圧密（低乾燥密度）ブロックの乾燥密度の実測値も示している。

図 2.2.3-2 には応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験の供試体の調整手順が示す。正規圧密供試体は、乾燥密度 1.6Mg/m^3 に静的に締固めた後に体積拘束条件で飽和したものであり、過圧密供試体は、乾燥密度 1.8Mg/m^3 に静的に締固めた後に乾燥密度 1.6Mg/m^3 まで膨潤させながら飽和したものである。このようにすることで、乾燥密度が同じであるが、膨潤による応力履歴が異なる供試体を直列に繋いだ膨潤量試験を実施可能になる。この試験によって膨潤量の経時変化が得られれば、図 2.2.3-3 に示すような力学的な解釈によるベントナイトの再冠水後の残留密度差を推定できる可能性がある。なお、ベントナイトの吸水膨潤が力学的な除荷と同等であるかどうかは議論の余地があるが、供試体の特徴を端的に示す名前としてこの名称を採用した。また、直列膨潤量試験は、過圧密供試体と正規圧密供試体の場合のみとして、正規圧密/正規圧密、過圧密/過圧密のケースはそれぞれ直列膨潤量試験にする必要がないため、1 供試体による通常の膨潤圧試験とした。解体の結果、過圧密供試体に給水面側に大きな密度低下（非均一な膨潤）が観察されたため、Case2-2 の過圧密供試体の膨潤は、十分に飽和させてから行った。この工程の変更は、 0.5M NaCl を用いた Case2s や Case3s の場合も同様である。

過圧密の試験ケースに関しては、前述のように、一旦、乾燥密度 1.8Mg/m^3 まで圧縮したものを 1.6Mg/m^3 まで膨潤させ、その後に膨潤圧を計測した。その後、十分に飽和したことを確認した後に、体積拘束条件（乾燥密度 1.6Mg/m^3 以下にならない様に拘束している）を解除して、膨潤圧の計測を行っていた。しかしながら、給水と膨潤変形を同時に実施させると密度分布が発生する可能性があることから、その後に開始した試験は、体積拘束下で給水飽和させた後に膨潤させることとした。よって、飽和中の膨潤圧は、乾燥密度 1.8Mg/m^3 での値となっている。

全てのケースについて本年度までに解体を行った。

表 2.2.3-1 応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験条件

試験ケース*	高乾燥密度 (Mg/m ³)	低乾燥密度 (Mg/m ³)	有効ベントナイト乾燥密度 (Mg/m ³)		初期含水比 (%)		応力履歴	平均乾燥密度 (Mg/m ³)	液種
1	1.584(NC) (1.6)		1.351		25.91		正規		
1-2	1.610(NC) (1.6)		1.379		22.33		正規		
2	1.794→1.596 (1.8→1.6)	1.589 (1.6)	1.576→ 1.368	1.357	25.91	18.97	正規+ 過圧密		
2-2	1.803→※ (1.8→1.6)	1.582 (1.6)	1.587→ ※	1.350	25.59	17.32	正規+ 過圧密		
3	1.798 →1.605 (OC) (1.8→1.6)		1.581 →1.368		18.97		過圧密		
1s	1.612(NC) (1.6)		1.381		24.69		正規		
2s	1.800→※ (1.8→1.7)	1.700 (1.7)	1.584→ ※	1.475	18.40	21.60	正規+ 過圧密	NaCl 水溶液 0.5M	
3s	1.810→※ (OC) (1.8→1.7)		1.595→※		17.96		過圧密		

➤ *飽和終了後に膨潤過程に移行
➤ ()は計値

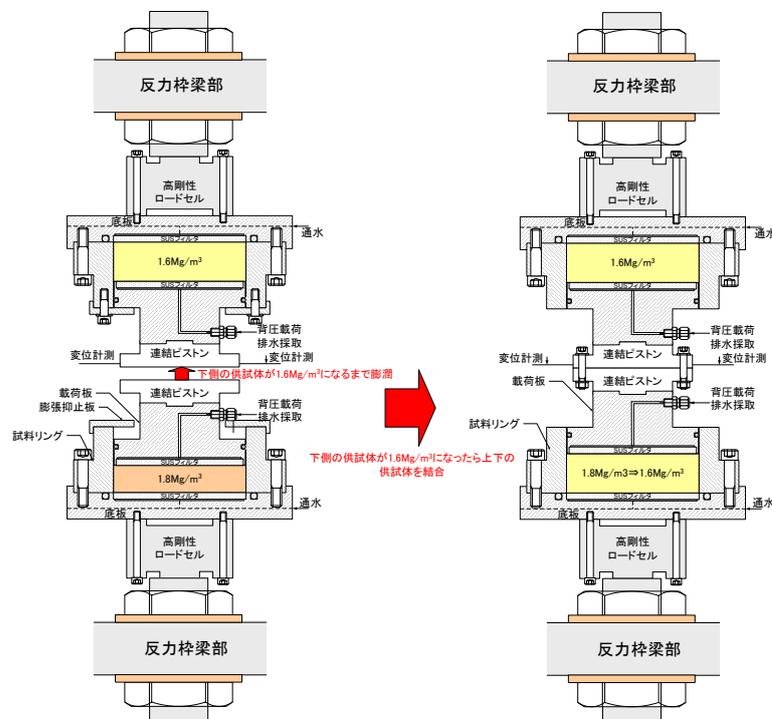


図 2.2.3-1 応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験の詳細図

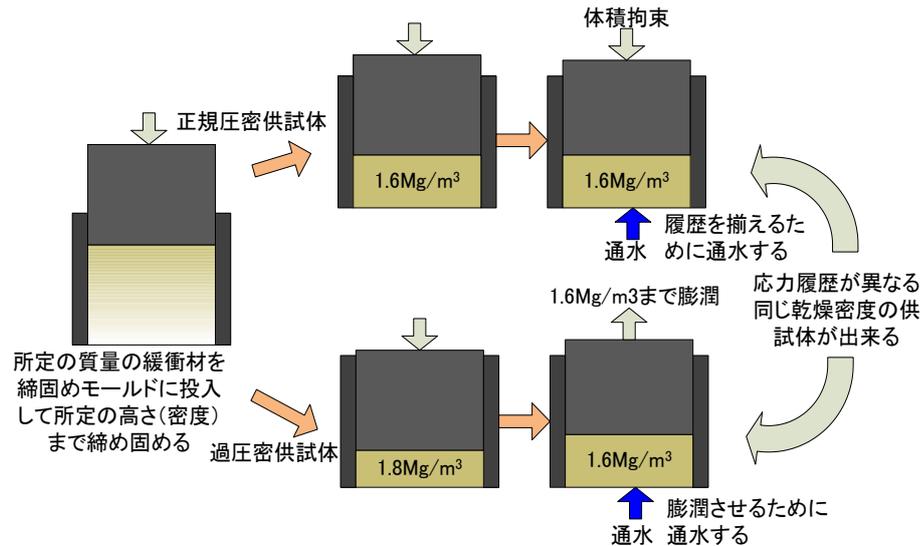


図 2.2.3-2 応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験の供試体調整手順

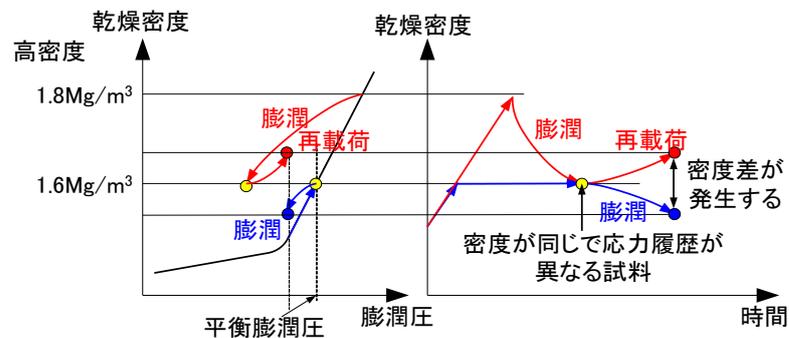


図 2.2.3-3 密度分布、及び膨潤量試験のイメージ

(2) 試験結果 (蒸留水のケース)

1) 膨潤量

図 2.2.3-4 に、Case2 の膨潤に伴う高密度供試体と低密度供試体の密度の経時変化を示す。図から、下部にある高密度供試体 (加圧密度供試体) が膨潤して、ほぼ乾燥密度が上部にある低密度供試体の乾燥密度 (1.6Mg/m^3) と同程度になっていることが分かる。

この試験では、膨潤量とベントナイトの乾燥密度が一意に対応しているのであれば、両供試体を接合しても密度が同じであるためほとんど膨潤変形が生じないはずである。しかしながら、図に示すようにピストンを介して接合し、体積拘束条件を解除したところ膨潤変形が生じている。これは、膨潤量とベントナイトの乾燥密度が一意に対応しているのではないことを示唆している。

ベントナイトに限らず、物体の変形は釣合いが満足されるまで生じるはずであり、乾燥密度が同じかどうかではなく、膨潤圧が釣合った時点で変形が止まると考えることのほうが自然である。この力学的な解釈が正しければ、図 2.2.3-3 に示したように、膨潤という応力履歴の違いによって、密度差は解消されないと考えられる。

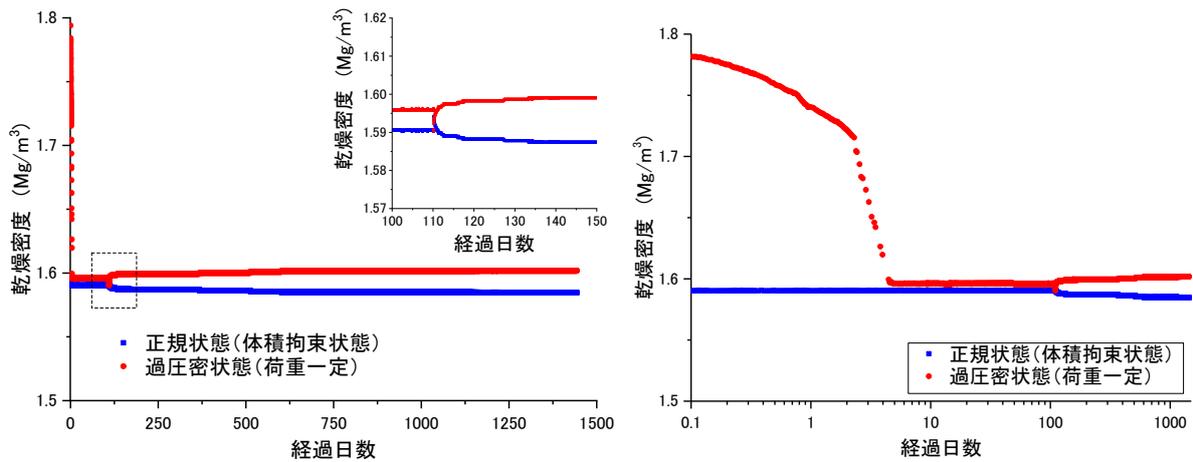


図 2.2.3-4 膨潤に伴う乾燥密度の経時変化に応力履歴が及ぼす影響

図 2.2.3-5 に正規圧密 (1.6Mg/m^3) 単体供試体、過圧密 (1.6Mg/m^3) と正規圧密 (1.6Mg/m^3) の直列供試体、および過圧密 (1.6Mg/m^3) 単体供試体の膨潤圧を示す。また、正規圧密単体供試体と過圧密 (1.6Mg/m^3) と正規圧密 (1.6Mg/m^3) の直列供試体の再現性確認試験結果も併せて示している。

正規圧密は 80 日後で 0.55MPa であり、この時点で試験を終了した。直列供試体は上下の体積拘束を除荷した 110 日以降は 0.5MPa であり、体積拘束除荷後 690 日まで定常状態である。これらの傾向は、再現性確認試験でも概ね同じであった。一方、過圧密供試体は、試験開始後 1 か月から 1000 日の期間に 0.4MPa から 0.6MPa に上昇した。

直列膨潤量試験では、ロードセルが上下の供試体の中間に設置されていることから、計測される膨潤圧は上下の供試体の内、小さい方の膨潤圧を計測することになる。その際、ロードセルは、大きな膨潤圧と小さな膨潤圧の差圧により、両者が釣り合うまで移動することになる。試験開始後 1 か月程度までの試験結果からは、直列膨潤量試験の結果は、過圧密供試体単体の膨潤圧とほぼ同等の値を示しているが、それ以降は過圧密供試体単体の膨潤圧が他のケースよりも大きくなっていることが分かる。直列膨潤量試験結果からは、正規圧密供試体の膨潤圧の方が、過圧密供試体の膨潤圧よりも大きくなっており、この結果が正しいとすれば、正規圧密供試体単体は過圧密供試体単体の膨潤圧よりもかなり大きくなっていないなければならない。そこで、試験期間が他のケースよりも短かった正規圧密の供試体に関しては、再現性確認の目的で再度膨潤圧試験実施した(Case1-2)。

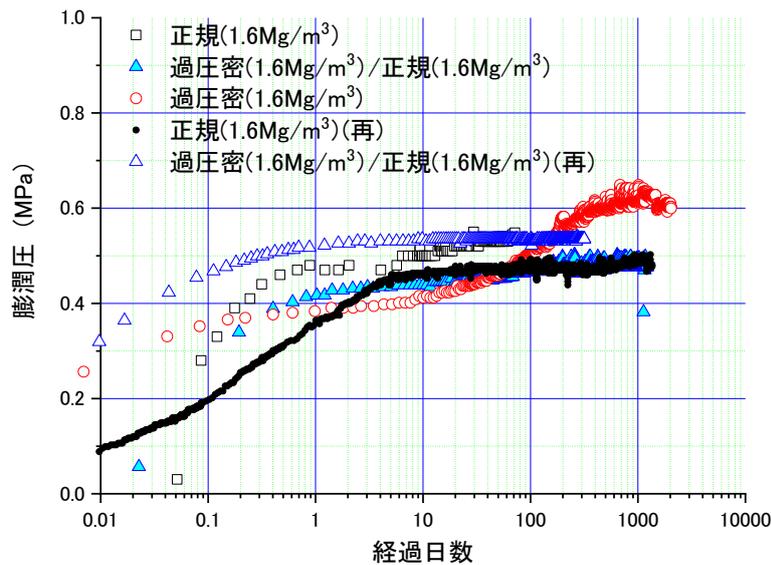


図 2.2.3-5 応力履歴が膨潤挙動に及ぼす影響評価（膨潤圧の経時変化）

なお、正規圧密供試体と過圧密供試体の直列膨潤量試験の再現性確認では、正規圧密供試体と過圧密供試体の直列膨潤量試験の解体の結果、過圧密供試体の給水側に密度低下が見られたことから、給水と膨潤を同時に実施せず、十分に飽和させた後に膨潤過程に移行する手順とした。このため、図 2.2.3-5 の膨潤挙動が定常に至るまでの経時変化が先行試験に比べ滑らかである。

2) 供試体解体結果

表 2.2.3-2 には今年度実施した過圧密供試体と正規圧密供試体の直列膨潤量試験ケースの解体結果を示す。解体には、前述の超音波カッターを用いた供試体スライサーを用いた。解体結果として示した乾燥密度と含水比は、図 2.2.3-6 に示すスライス試料の値の合計値や平均値として算出したものである。表から、正規圧密供試体が過圧密供試体を押し戻していることが分かった。

図 2.2.3-6 には解体時に取得した乾燥密度分布を示している。図から、変形量が小さい正規圧密供試体は密度分布が少なく、変形量が大きい過圧密供試体は供試体中心部の密度が高く、上下面の密度が低いという密度分布であることが分かった。

表 2.2.3-2 応力履歴の影響評価のための直列膨潤量試験（再現性確認ケース）の解体結果

		正規圧密供試体	過圧密供試体
供試体作製時	直径 (mm)	60.00	60.00
	高さ (mm)	19.89	17.70
	体積 (cm ³)	56.238	50.046
	湿潤質量 (g)	112.97	106.68
	含水比 (%)	26.94	18.73
	乾燥質量 (g)	88.99	89.85
	湿潤密度 (Mg/m ³)	2.009	2.132
	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.582	1.795
膨潤後供試体	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.600	1.600
解体結果	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.572	1.629
	含水比 (%)	26.54	24.03

本試験においては、応力履歴以外、諸元が同じ供試体の押し合いをさせたが、試験の過程で正規圧密供試体と過圧密供試体で異なる密度分布が発生した。また、この現象は再現性もあることが分かった。そのため、本試験結果に密度分布が及ぼす影響に関しては検討が必要である。均質な供試体よりは密度分布を有する供試体の方が平衡膨潤圧が高いことがこれまでの試験結果で示されている。このことから、過圧密供試体の方が膨潤圧が高くなることになり、過圧密供試体に圧縮されなければならない。しかしながら、本試験では、正規圧密供試体が過圧密供試体を圧縮しており、この逆転現象が応力履歴に依るものとも考えることもできる。すなわち、共に密度分布が同じで応力履歴だけが異なる供試体を作製できたら、本試験の結果はもっと大きく正規圧密供試体が過圧密供試体を圧縮したことが予想される。

なお、本試験に限らず、供試体を均等に膨潤させる方法については検討が必要である。

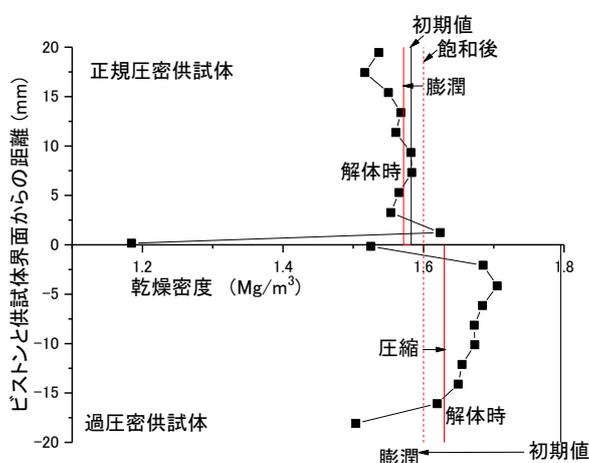


図 2.2.3-6 応力履歴の影響評価のための直列膨潤量試験の乾燥密度分布

(3) 試験結果 (0.5M NaCl ケース)

1) 膨潤量の経時変化

イオン強度の影響により、0.5M NaCl のケースの平衡膨潤量は、蒸留水のケースよりも小さい。そのため、予備試験として行った 1.8 Mg/m³ でスタートした 0.5M NaCl のケースにおける過圧密供試体の乾燥密度の平衡値は乾燥密度 1.6Mg/m³ に達しなかった。この結果から、0.5M NaCl を用いて実施した直列膨潤量試験は、正規圧密供試体の乾燥密度は 1.7Mg/m³、過圧密供試体の乾燥密度は 1.8Mg./m³ を飽和後に 1.7Mg/m³ に膨潤させた後に直列に繋ぐこととした。

図 2.2.3-7 に、0.5M NaCl を用いて、正規圧密供試体の乾燥密度は 1.7Mg/m³、過圧密供試体の乾燥密度は 1.8Mg./m³ を飽和後に 1.7Mg/m³ に膨潤させた後に直列膨潤量試験を実施した際の乾燥密度の経時変化を示す。

過圧密供試体の膨潤挙動が定常になっていることが確認できた段階でストッパーを解除して直列膨潤量試験に移行した。図 2.2.3-7 には、直列膨潤量試験に移行後の乾燥密度変化も併せて示している。図より、両者の乾燥密度が同等であるのにも拘らず、応力履歴の違いによって密度分布が発生していることが分かる。このことは、前述の蒸留水のケースと同様である (図 2.2.3-4)。直列膨潤量試験を実施した乾燥密度が異なるので一概に比較できないが、蒸留水の場合に比べ、0.5M NaCl の方が押し戻す量が小さい。

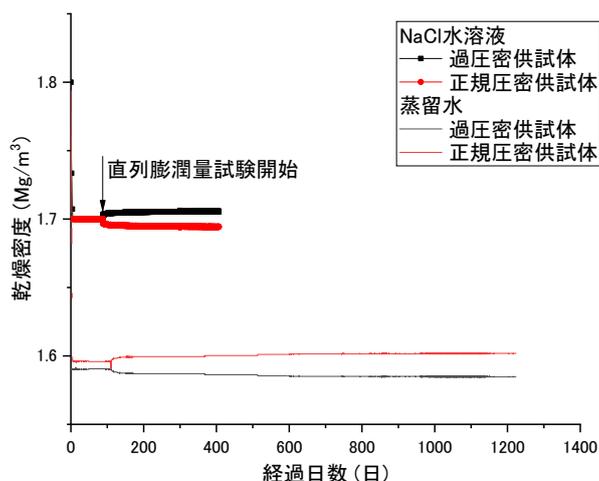


図 2.2.3-7 直列膨潤量試験の乾燥密度の経時変化 (0.5M NaCl ケース)

2) 過圧密 (1.7Mg/m³) と正規圧密 (1.7Mg/m³) の直列供試体の解体

表 2.2.3-3 には過圧密供試体と正規圧密供試体の直列膨潤量試験の解体結果を示す。解体には、前述の超音波カッターを用いた供試体スライサーを用いた。表から、正規圧密供試体が過圧密供試体を押し戻していることが分かる。この結果は蒸留水の場合と同様である。なお、解体時の含水比は、炉乾燥法で取得しているが、この際に間隙水に溶解している塩が析出して固相として評価されることになる。そのため、この溶解している塩の質量分は 3.2.2.(2) 3) で示した補正法を用いて、補正した値を示している。

表 2.2.3-3 過圧密供試体と正規圧密供試体の直列膨潤量試験の解体結果

		正規密度供試体	過密度供試体
供試体作製時	直径 (mm)	60.00	60.00
	高さ (mm)	19.73	18.76
	体積 (cm ³)	55.785	53.043
	湿潤質量 (g)	115.32	113.02
	含水比 (%)	21.60	18.40
	乾燥質量 (g)	94.83	95.46
	湿潤密度 (Mg/m ³)	2.067	2.131
	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.700	1.800
膨潤後	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.700	1.700
解体結果	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.694	1.706
	含水比※ (%)	21.95	20.93

※間隙水に溶解してる塩を液相として補正

図 2.2.3-8 には解体時に取得した乾燥密度分布を示している。これまでの過圧密供試体と正規圧密供試体の直列膨潤量試験では、変形量が小さい正規圧密供試体は密度分布が少なく、変形量大きい過圧密供試体は供試体中心部の密度が高く、上下面の密度が低いという密度分布を示していたが、本ケースでは、正規圧密供試体の乾燥密度が給水面側（成型時の底面側）で小さく排水面側（ピストン側、成型時の圧縮側）で大きくなっている。これは、0.5M NaCl を通水液として使用したため、供試体作製時の密度分布がそのまま残ったものと考えられる。一方、過圧密供試体は蒸留水の場合と同様の傾向ではあるが、乾燥密度分布の最大値と最小値の差は蒸留水の場合に比べて小さいことが分かった。

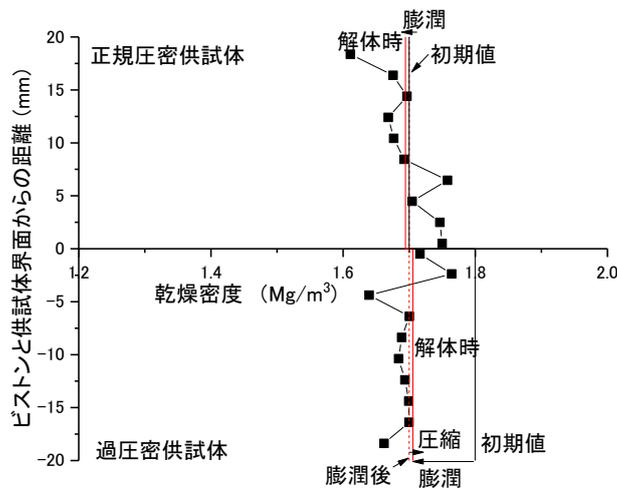


図 2.2.3-8 直列膨潤量試験の乾燥密度分布

3) 正規圧密供試体 (1.6Mg/m³) の解体

表 2.2.3-3 には正規圧密供試体の膨潤量試験の解体結果を示す。解体は、前項と同じ方法で行った。解体時の含水比は、炉乾燥法で取得し、塩の質量分についても前項と同様に補正している。

表 2.2.3-4 正規圧密供試体の膨潤量試験の解体結果

		正規密度供試体
供試体作製時	直径 (mm)	60.00
	高さ (mm)	19.83
	体積 (cm ³)	56.068
	湿潤質量 (g)	112.63
	含水比 (%)	24.20
	乾燥質量 (g)	90.69
	湿潤密度 (Mg/m ³)	2.009
	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.617
解体結果	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.565
	含水比※ (%)	24.97

※間隙水に溶解してる塩を液相として補正

図 2.2.3-8 には解体時に取得した乾燥密度分布を示している。図から、正規圧密供試体の乾燥密度が給水面側（成型時の底面側）で小さくなっている。これは、0.5M NaCl を通水液として使用したため、供試体作製時の密度分布がそのまま残ったものと考えられる。なお、排水面側（ピストン側、成型時の圧縮側）で乾燥密度が低下傾向を示しているのは、体積拘束をしたにも関わらず試験後の乾燥密度が低下していることから、解体時の除荷やスライス時の乱れの影響が考えられる。

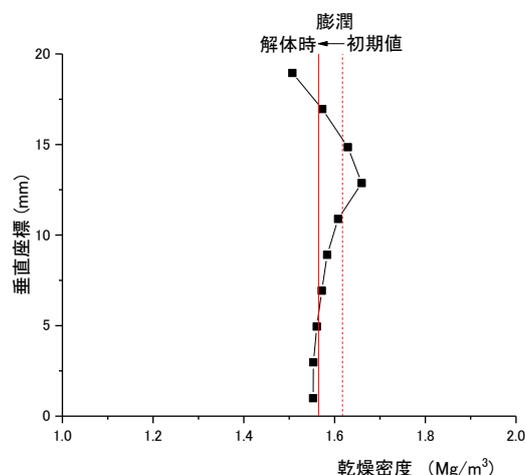


図 2.2.3-9 正規圧密供試体の膨潤量試験後の乾燥密度分布

4) 過圧密供試体 (1.6Mg/m³) の解体

表 2.2.3-3 には過圧密供試体の膨潤量試験の解体結果を示す。解体には、超音波カッターを用いた供試体スライサーを用いた。解体結果は、図 2.2.3-10 に示すスライス試料の値の合計値や平均値として算出したものである。なお、解体時の含水比は、炉乾燥法で取得しているが、この際に間隙水に溶解している塩が析出して固相として評価されることになる。そのため、この溶解している塩の質量分は液相として補正している。

表 2.2.3-5 過圧密供試体の直列膨潤量試験の解体結果

		過密度供試体
供試体作製時	直径 (mm)	60.00
	高さ (mm)	18.81
	体積 (cm ³)	53.18
	湿潤質量 (g)	113.35
	含水比 (%)	18.39
	乾燥質量 (g)	95.74
	湿潤密度 (Mg/m ³)	2.131
	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.800
膨潤後	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.700
解体結果	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.708
	含水比※ (%)	20.37

※間隙水に溶解してる塩を液相として補正

図 2.2.3-10 には解体時に取得した乾燥密度分布を示している。図 2.2.3-9 の正規圧密供試体と同様に、供試体の上下端面で密度低下みられる。ただし、飽和期間を設けたこと、設定膨潤量が小さいこと、間隙水のイオン強度の影響で膨潤し難いことなどから、その低下割合は蒸留水の場合に比べ小さい。供試体を均等に膨潤させるために、飽和期間を設けたが、効果を定量的に示すことは困難であった。均等に膨潤させるためには、例えば氷とベントナイト材料の混合物を圧縮し、解凍させて内部から給水するなどの工夫が必要である。

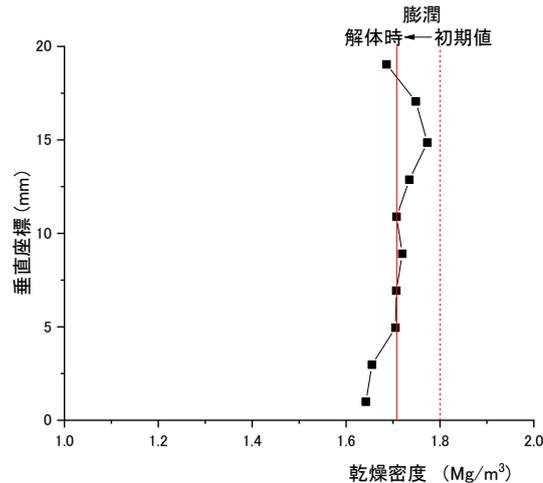


図 2.2.3-10 過圧密供試体の膨潤量試験後の乾燥密度分布

2.2.4 密度均一化に関する力学的な解釈と結果の反映

(1) 力学に立脚した残留密度差の理論的解釈

ベントナイト系材料は、再冠水によって膨潤するため、緩衝材の施工時の密度分布や隙間などがあっても、飽和後には均質化すると考えられている。そのため、過去に密度分布を有する供試体が均質化する様子を取得する試験は数多くなされてきた。しかしながら、これらの試験で密度分布がなくなるまで均質に膨潤した例は無い。いずれの結果も、初期に均質化する傾向が見られるものの、最終的には密度差を残したままで膨潤変形が収束している。

ベントナイト系材料が均質化するということを説明するために、熱力学や鉱物化学的なアプローチでは変形という概念を導入することが難しい。基底間隔を積み重ねた物が膨潤量としても、境界条件を導入できないためである。このため、これまでの評価では、不均質な湿潤環境における力学的な検討が不十分であったため、乾燥密度と膨潤圧、膨潤量は一意的関係にあると考えられてきた。密度の異なるベントナイト系材料を接触させた膨潤による均質化試験は先行圧密圧力（降伏点）と初期応力状態の異なる材料のサクシオンを開放させた場合の変形試験と考えられる。この時考慮すべき応力はこれだけではなく、浸透膨潤に伴う膨潤応力も考慮しなければならない。この浸透膨潤応力は、熱力学的には単位体積当たりのモンモリロナイトと水のモル数によって決まる。力学的には、物体の変形は、浸透膨潤応力を含む力が釣り合う点で止まると考えられる。しかしながら、従来の解釈は、浸透膨潤応力のみを考えていたため、乾燥密度が同じ（単位体積当たりのモンモリロナイトと水のモル数が同じ）であれば同じ密度になるまで膨潤変形すると考えられてきたと考えられる。このような力学的な観点から、従来行われてきたベントナイト系材料の均質化試験を考えると、残留密度差は応力のつり合いで解釈できることが明らかとなった。

(2) 既往の成果による残留密度差の理論的解釈

図 2.2.4-1 には、Sasakura ら[3]が取得したクニゲル V1 の一次元段階載荷圧密試験から得られ

る乾燥密度- $\log p$ 関係（応力ひずみ関係）に、乾燥密度 1.8Mg/m^3 と 1.4 Mg/m^3 のケイ砂 30wt% 混合ベントナイトの直列均質化試験（Case1）の膨潤圧を有効ベントナイト乾燥密度に対してプロットしている。この有効ベントナイト乾燥密度 ρ_{ben} は、ベントナイト部分の土粒子体積 V_b と空隙 V_v （全体の体積からベントナイト以外の鉱物を引いたもの）に対するベントナイト部分の土粒子質量 W_b の割合で定義され、 $\rho_{ben} = \frac{W_b}{V_v + V_b}$ と示される。

このケースの場合、両者が釣り合うと考えられる乾燥密度と試験の最終乾燥密度に差があることが分かる。但し、上部供試体（低密度供試体）が下部供試体（高密度供試体）の膨潤に従って圧縮され、両者の密度差が縮まり、膨潤圧も増加傾向にあることから、両供試体の膨潤圧が釣り合うところで均一化の傾向は止まり、残留密度差が残るものと考えられる。

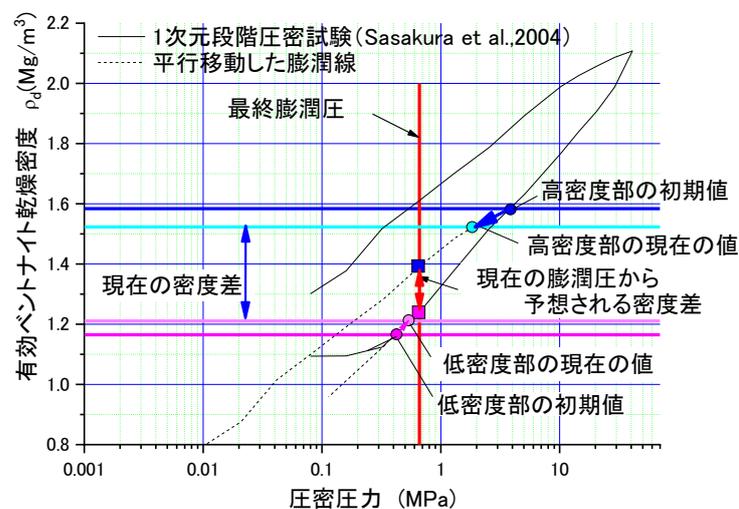


図 2.2.4-1 残留密度分布の力学的解釈(Case1)

図 2.2.4-2 には、Sasakura ら [2] が取得したクニゲル V1 の一次元段階載荷圧密試験から得られる乾燥密度- $\log p$ 関係（応力ひずみ関係）に、前述の 2.2.2 で述べた乾燥密度 2.0Mg/m^3 と 1.2 Mg/m^3 のケイ砂 30wt% 混合ベントナイトの直列均質化試験（Case2）の膨潤圧を有効ベントナイト乾燥密度に対してプロットしている。

初期には高密度部と低密度部の応力状態は、両者とも正規圧密線上に存在している（図中 ●、●）。高密度部分は膨潤しながら乾燥密度が低下するので、膨潤線を辿って ● まで至っている。一方、低密度部は高密度部の膨潤によって圧縮され、密度が増加する。そのため、● に至る。これに対して、両者の間に設置してあるピストンのロードセルから計測される膨潤圧は、図中の赤線で示してあるように、約 0.64MPa である。これらの関係を見ると、● の応力値と ● の応力値はほぼ釣り合い状態にあり、その値はおおよそ $0.6\sim 0.7\text{MPa}$ 程度である。その時に得られる密度差は図より約 0.22Mg/m^3 であり、実測が約 0.25Mg/m^3 である。若干のずれの原因は、膨潤圧試験における摩擦の影響や圧密試験の材料の相違などが考えられるが、これらを勘案しても、力学的な解釈で、おおよその残留密度差の説明ができることが分かった。

さらに図 2.2.3-2 には Case3 の膨潤圧を有効ベントナイト乾燥密度に対してプロットしている。Case1、2 の場合と同様に、初期には高密度部と低密度部の応力状態は、両者とも正規圧密線上に存在している(図中●、●)。高密度部分は膨潤しながら乾燥密度が低下するので、膨潤線を辿って●まで至っている。一方、低密度部は高密度部の膨潤によって圧縮され、密度が増加する。そのため、●に至る。これに対して、両者の間に設置してあるピストンのロードセルから計測される膨潤圧は、図中の赤線で示してあるように、約 0.66MPa であった。試験は、工期と継続して得られる結果が予測できることから、膨潤圧から推定される密度差に至る前に解体した。解体までに得られた結果は、上記の釣り合い状態に至るまで膨潤することを否定するものではなかった。この実験事実が正だとすれば、圧密試験などから、載荷～除荷試験を実施し、正規圧密曲線と膨潤曲線を取得すれば、工学的に均一化すると見なせる初期乾燥密度を取得することが可能となる。

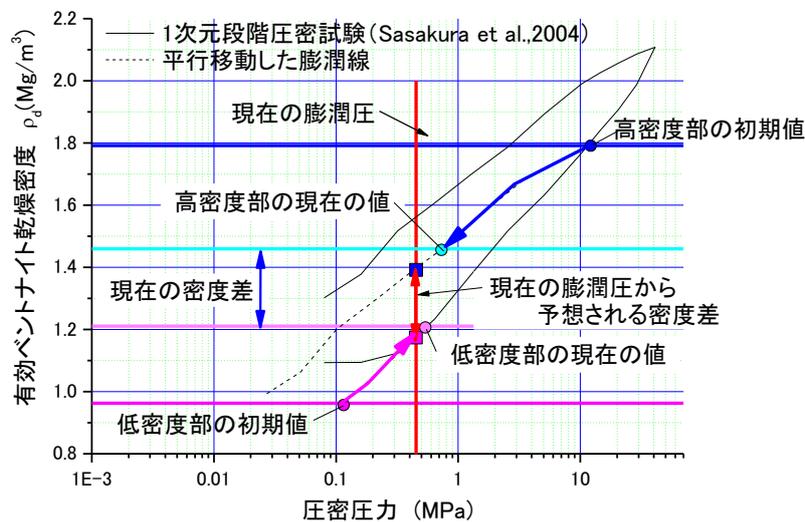


図 2.2.4-2 残留密度分布の力学的解釈(Case2)

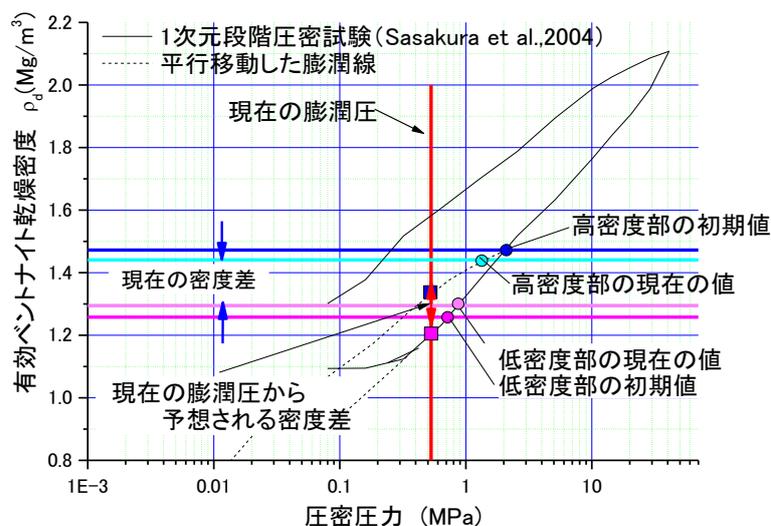


図 2.2.4-3 残留密度分布の力学的解釈(Case3)

図 2.2.4-4 には、Sasakura ら[2]が取得したクニゲル V1 の一次元段階荷重圧密試験から得られる乾燥密度- $\log p$ 関係(応力ひずみ関係)に、2.2.3 で述べた乾燥密度は上下共に 1.6Mg/m^3 のケイ砂 30wt%混合ベントナイトであるが応力履歴が異なる供試体の直列均質化試験の結果をプロットしている。なお、これも図 2.2.4-1 と同様に図中の縦軸は有効ベントナイト乾燥密度に換算してある。初期には上部の正規圧密供試体は応力状態が正規圧密線上に存在している(図中●)。一方、過圧密供試体は除荷線上で乾燥密度が 1.6Mg/m^3 に相当する有効ベントナイト乾燥密度の点(図中●)に応力状態が存在している。よって、密度は同じであるが、応力状態が異なることになる。ここで、直列膨潤量試験を行うと、正規圧密供試体の方が、応力状態が大きいため、膨潤し(図中●)、過圧密供試体を圧縮する(図中●)。試験終了まで、応力が釣り合うまで膨潤変形するという解釈に整合するように両供試体の応力状態は推移した。

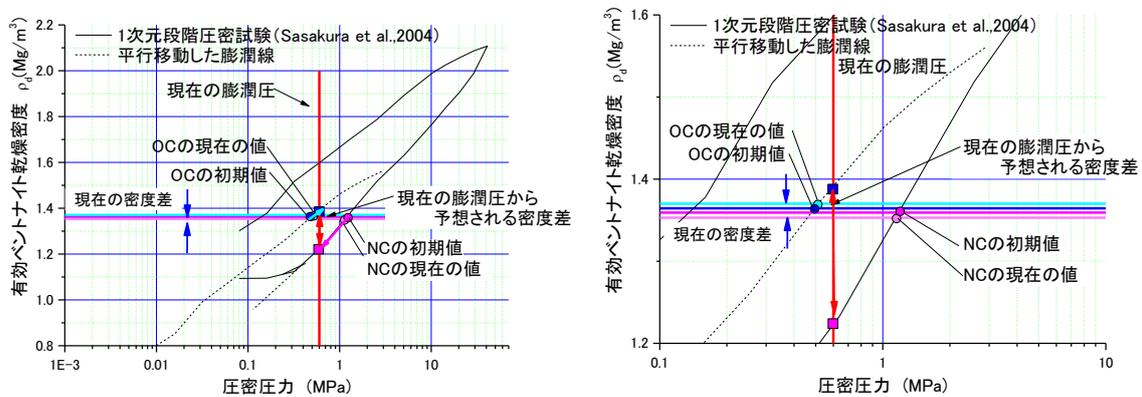


図 2.2.4-4 応力履歴による密度差の発生に関する力学的解釈(右図:拡大図)

(3) 緩衝材の仕様への反映

密度差が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響(密度均質化の検討)の試験の成果によって、施工時の密度差、および応力履歴が緩衝材の均質化に及ぼす影響が示された。さらに、応力履歴の影響を推定できる力学的な解釈が可能となった。これにより、図 2.2.4-5 に示すような緩衝材製作時の仕様への反映が期待できる。すなわち、

- ① ベントナイトの膨潤によって均質化が期待できる密度差が定量的に与えられる。
- ② 緩衝材の施工方法に起因するベントナイトの密度分布(密度差)が施工試験などによって定量評価できる。
- ③ ①、②から施工方法毎に膨潤後の密度分布が推定できる。
- ④ 膨潤後の密度分布と透水係数の要求性能を比較することによって、施工方法の選択における指標を示すことが可能となる。

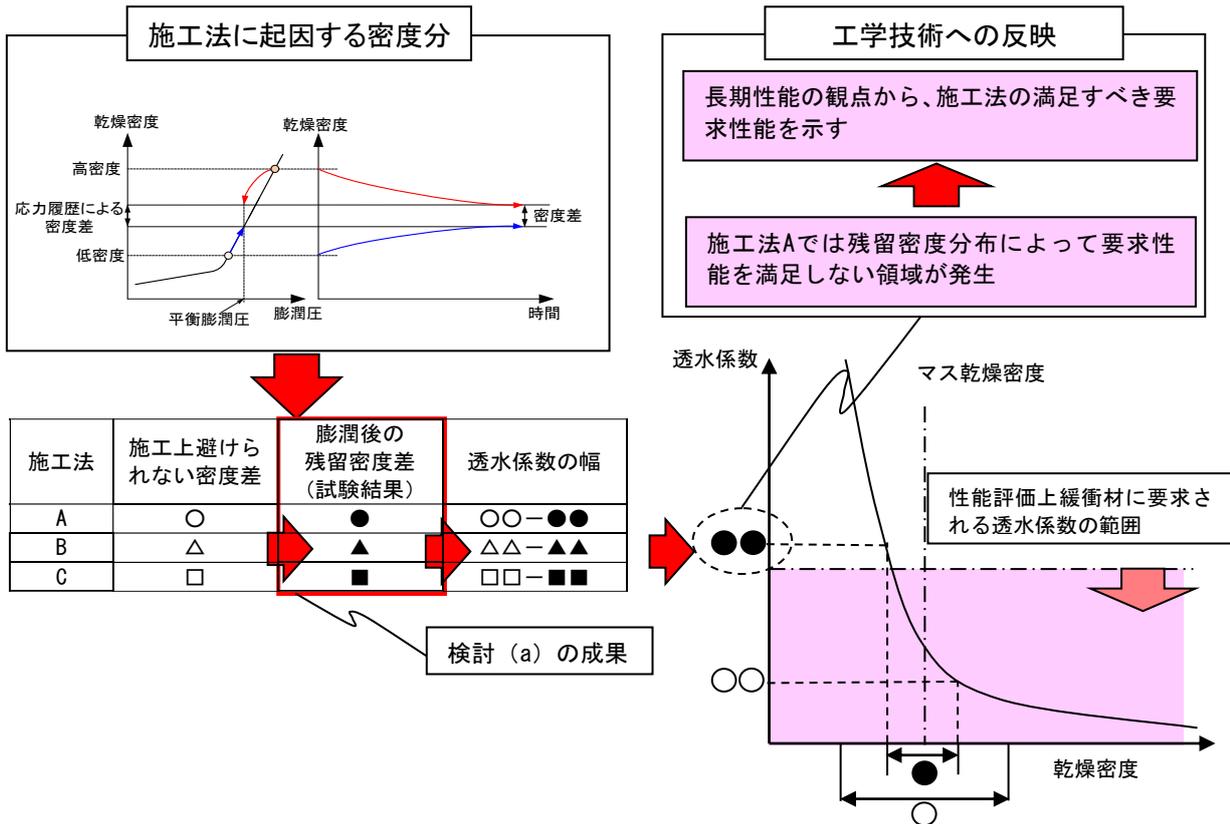


図 2.2.4-5 施工特性が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響試験の緩衝材の仕様への反映イメージ

表 2.2.4-1 に、直列膨潤圧試験の結果として得られた残留密度分布に Kozeny-Carman 則を適用して得られる透水係数を示す。Kozeny-Carman 則は、乾燥密度 $\rho_d(g/m^3)$ を用いて下式で表される。

$$k = \frac{1}{5} \frac{\rho g}{\mu} \frac{1}{Sv^2} \frac{e^3}{1+e} = \frac{1}{5} \frac{\rho g}{\mu} \frac{1}{\left(\frac{36w^*}{\rho_d}\right)^2} \frac{(\frac{\rho_s}{\rho_d} - 1)^3}{\frac{\rho_s}{\rho_d}} \quad \text{式 2.2-10}$$

ただし、土粒子密度 $\rho_s = 2.733 \times 10^6 g/m^3$ 、二層膨潤含水比 $w^*[4]$ を用いた。

二層膨潤含水比 w^* は、液種やベントナイト毎に含水比をパラメータにした XRD から取得するものであるが、本検討では、蒸留水と NaCl 水溶液のケースの乾燥密度と透水係数の関係は、図 2.2.4-6 に示すように、既往の研究[5]から取得した乾燥密度と透水係数の関係に、二層膨潤含水比 w^* をパラメータとして Kozeny-Carman 則をフィッティングさせたものを使用した。

表 2.2.4-1 直列膨潤圧試験結果に基づく残留密度分布と透水係数

試験ケース*	液種	初期状態 (施工直後)				膨潤後 (再冠水後)			
		高乾燥密度 (Mg/m ³)	低乾燥密度 (Mg/m ³)	高乾燥密度 透水係数 (m/s)	低乾燥密度 透水係数 (m/s)	高乾燥密度 (Mg/m ³)	低乾燥密度 (Mg/m ³)	高乾燥密度 透水係数 (m/s)	低乾燥密度 透水係数 (m/s)
1	蒸留水	1.798	1.399	9.54E-14	6.49E-13	1.741	1.449	1.23E-13	5.05E-13
2		1.984	1.190	4.56E-14	1.91E-12	1.686	1.445	1.59E-13	5.15E-13
3		1.698	1.493	1.50E-13	4.06E-13	1.665	1.533	1.76E-13	3.33E-13
1s	NaCl 水溶液 (0.5M)	1.790	1.426	2.28E-12	1.31E-11	1.758	1.452	2.63E-12	1.14E-11
2s		1.991	1.187	1.03E-12	4.46E-11	1.835	1.298	1.87E-12	2.50E-11
3s		1.747	1.550	2.76E-12	7.06E-12	1.731	1.565	2.97E-12	6.56E-12

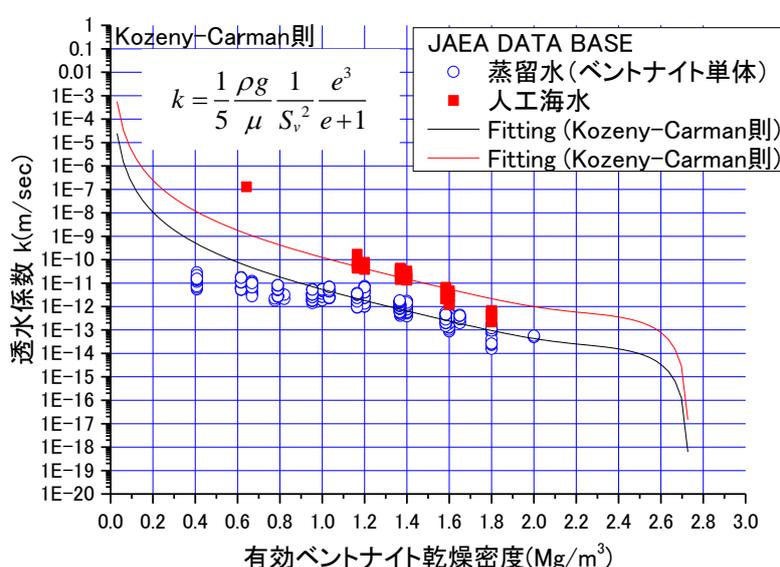


図 2.2.4-6 JAEA DATABASESE[5]に対する Kozeny-Carman 則のフィッティング結果

図 2.2.4-7 には、表 2.2.4-1 に示した直列膨潤圧試験の結果として得られた残留密度分布に Kozeny-Carman 則を適用した結果を示す。図から、試験前の乾燥密度分布が最大で 1.2Mg/m³ から 2.0Mg/m³ 程度であったが、試験後には、蒸留水のケースでは乾燥密度分布が 1.45Mg/m³ から 1.69Mg/m³ 程度まで解消されていることが分かる。一方、NaCl 水溶液のケースでは、乾燥密度分布が 1.30Mg/m³ から 1.84Mg/m³ 程度までしか解消されていない。この結果を Kozeny-Carman 則に適用すると、試験後の透水係数は、蒸留水のケースでは、10⁻¹³m/s オーダーであるが、NaCl 水溶液のケースでは、10⁻¹¹m/s から 10⁻¹²m/s 程度である。

ここで、試験前の密度分布を緩衝材施工直後の密度分布、試験後の密度分布を再冠水後の密度分布として考えると、仮に、処分サイトの地下水が 0.5M 程度の海水系地下水で緩衝材の要求性能が 5×10⁻¹²m/s 以下であるとすると、膨潤後の乾燥密度は 1.63Mg/m³ 以上でなければならない。この乾燥密度を満足するために許容される緩衝材の施工時の乾燥密度は試験結果から、1.55Mg/m³ から 1.75Mg/m³ 程度であることが分かる。

このように、本試験結果をまとめることで、緩衝材の施工方法の仕様を、再冠水後の緩衝材の

性能を考慮して決定することが可能となる。

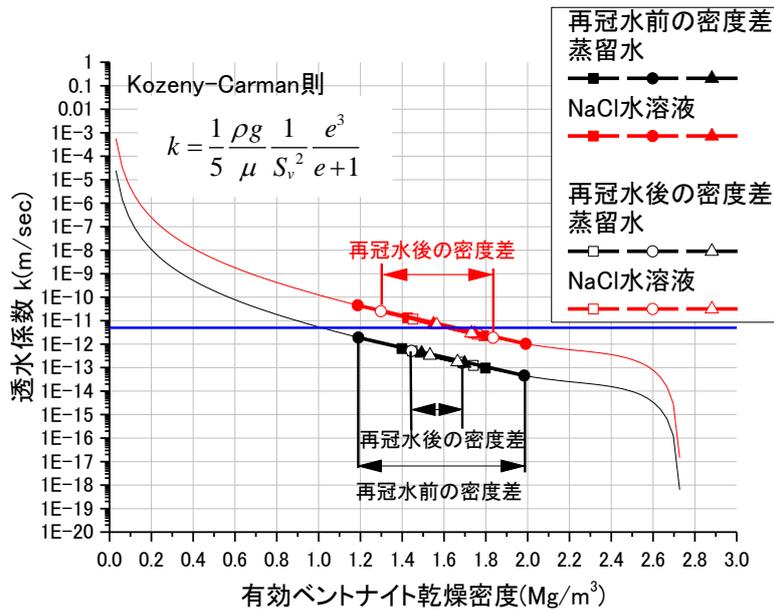


図 2.2.4-7 Kozeny-Carman 則を用いた残留密度差と透水係数の関係

(4) 解析技術への反映

本検討で実施した小規模試験を弾塑性力学に立脚した土水連成解析によって別途解析した。その解析では、緩衝材の膨潤挙動は、サクシオン圧の開放と比表面積の増加で表現した。このような土構造骨格の力学とその間隙を満たす水の水理を連成させた解析によって、ベントナイトの膨潤挙動に関して次のような知見が得られた。

膨潤圧試験のイメージ図を図 2.2.4-8 に示す。図に示すように、膨潤圧試験では、体積拘束したベントナイトを水で飽和させた際の膨潤圧を計測する。同じ密度で膨潤圧セルと供試体間に摩擦がない場合、供試体高さだけが異なる場合、取得される膨潤圧は同じである。なぜならば、内力が釣り合う（相殺される）ためである。これは図に示したバネに例えるとわかりやすい。同じバネ定数のバネをいくつ直列に繋いでも、同じひずみを与えた場合の反力は同じである。

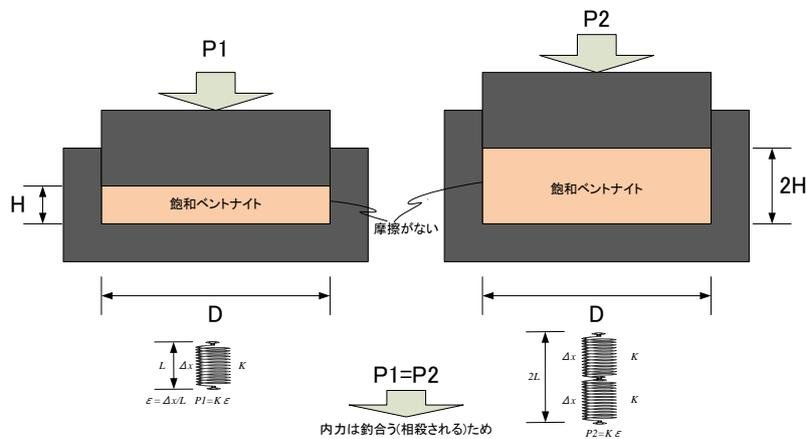


図 2.2.4-8 膨潤圧試験のイメージ

次に、図 2.2.4-9 のような状態を考える。左図は膨潤圧試験の開始直後のイメージである。左図に示すように、給水側である底面に飽和領域があり、その上部に不飽和領域がある状態を考える。この場合でもやはり、飽和領域は、右図に示す完全に飽和した状態とほぼ同じ膨潤圧を發揮する。これは、図 2.2.4-8 に示したバネの上に質量を無視できる程度に小さい剛体が乗っている状態と同じである。これが実際の膨潤圧試験において、試験開始直後に最大膨潤圧が發揮される理由である。

このように解釈すると、図 2.2.4-10 に示すように、高飽和度のベントナイトの膨潤圧試験と低飽和度の膨潤圧試験で得られる膨潤圧の経時変化が異なることもサクシジョンの開放である程度説明が出来る。すなわち、試験開始直後に底面に飽和領域が形成されると、最大膨潤圧が發揮される。その一方で、後述する長尺ベントナイトの一次元浸潤速度取得試験の試験結果からも明らかのように、飽和領域ではサクシジョンがなくなるため吸水速度が低下する。初期飽和度が高い供試体の場合、不飽和領域のサクシジョンは大きくないため、低下した吸水速度よりも供試体内部での浸透速度が遅ければ膨潤圧は低下せず一定値を保つ（図 2.2.4-10 左）。一方、初期飽和度が低い供試体の場合、不飽和領域のサクシジョンが大きいため、低下した吸水速度よりも供試体内部での浸透速度が速ければ飽和領域が不飽和化するために膨潤圧が低下し、膨潤圧の経時変化においてピーク値を示す（図 2.2.4-10 右）。

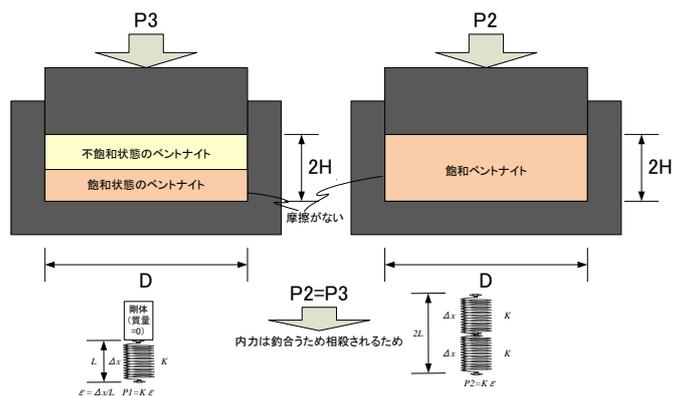


図 2.2.4-9 膨潤圧試験開始直後のイメージ

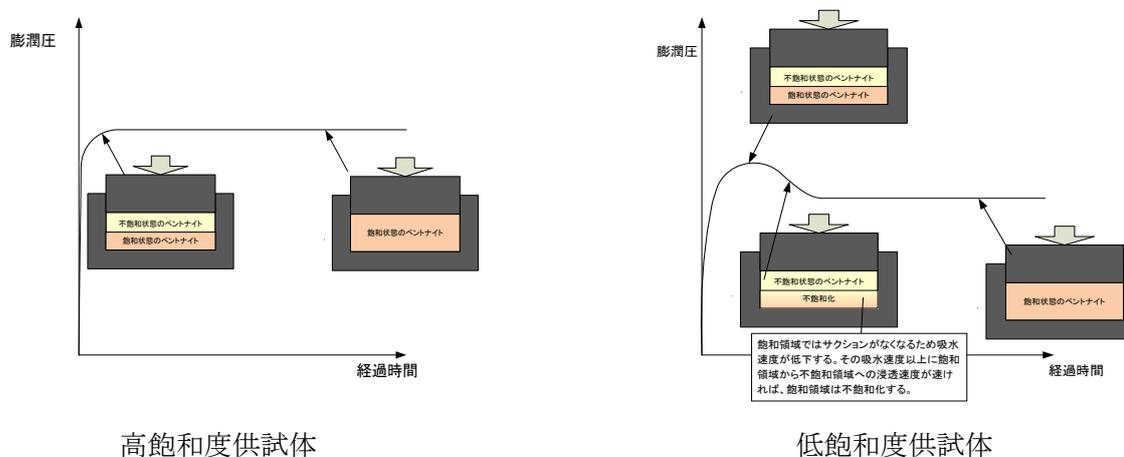


図 2.2.4-10 高・低飽和度供試体の膨潤圧試験のイメージ

本検討では、このバネの反力がサクシヨンの開放によって生じるというモデル化によってベントナイトの膨潤挙動がある程度表現できると考えている。また、このサクシヨンは水分特性曲線によって飽和度の関数として与えられており、言い換えれば、バネの反力は飽和度の関数となっている。本解析で用いた水分特性曲線では、サクシヨンは飽和度が1(100%)になればゼロになるという、非膨潤性鉱物のモデルを用いているために、平衡膨潤圧がゼロとなり、ベントナイトの実験事実をきちんと表現できない。言い換えれば、ベントナイトのような膨潤性鉱物の水分特性曲線を取得できれば力学と水理解析でも膨潤圧を取得できることになる。

ベントナイトのような膨潤性鉱物の水分特性曲線を取得する方法は、幾つか考えられるが、最も簡単な方法は、膨潤圧試験において平衡蒸気圧を制御した膨潤圧試験を実施し、平衡蒸気圧と飽和度関係から、飽和度と膨潤圧の関係を取得する方法である。この際の膨潤圧が全てサクシヨンの開放によるものと見做せば、図 2.2.4-11 に示すような膨潤性鉱物の水分特性曲線が得られる。この膨潤性鉱物の水分特性曲線を、不飽和挙動を考慮した土水連成解析に導入すれば、ベントナイトの膨潤挙動を精度良く表現可能と思われる。さらに、このような現象論的なアプローチではなく、例えば Komine and Ogata[6]による微視的考察による熱力学的な観点から得られた浸透膨潤圧の推定式を用いて、力学膨潤と浸透膨潤の和として膨潤挙動を表わすという、より高度なアプローチも考えられる。

また、本検討によってベントナイト系材料であっても、一般の地盤材料と同様に、応力履歴の影響を受け、その影響で均質化しない可能性があることを指摘できた。このことは、試験実施前から予想していた通りであるとは言え、これまでは力学試験結果と膨潤による均質化試験から得られる残留密度差が整合しているという実験事実から外挿していたものであり、この推論の確証を得るためには、再現性の確認や様々な初期条件からの膨潤圧、膨潤量試験を行う必要がある。

今回実施した膨潤圧、膨潤量試験は力学的解釈のために実施され、この試験での初期成型圧や初期含水比なども重要なパラメータとなる。また、応力ひずみ関係に相当する間隙比（乾燥密度）と圧密圧力の関係や水分特性曲線を取得すること必要である。これらの取得により、ベントナイトの膨潤モデルの構築や解析コードの高度化などが実施可能となると考える。

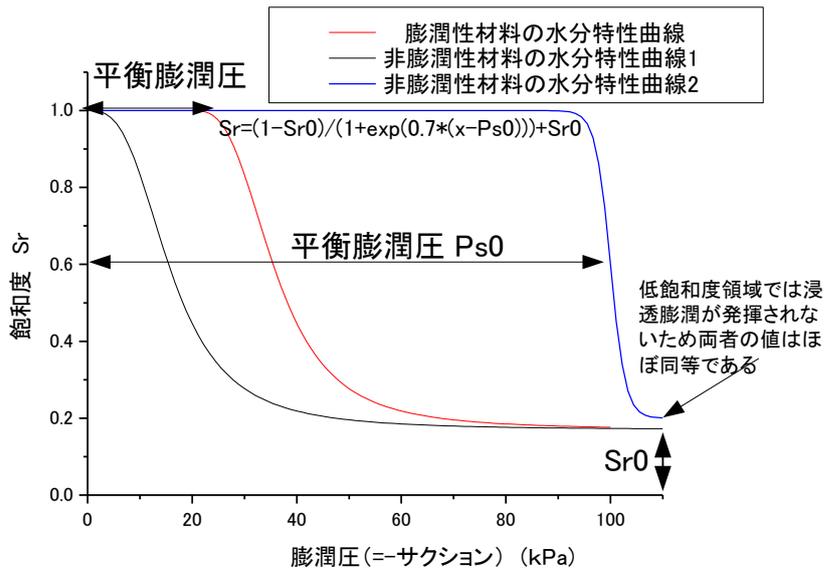


図 2.2.4-11 膨潤性鉱物の水分特性曲線のイメージ

第2章 参考文献

- [1] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成28年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書（第2分冊） 2017
- [2] Sasakura, T., Kobayashi, I., Sahara, F., Murakami, T., Ohi, T., Mihara, M. and Itoh, H.: Studies on mechanical behavior of bentonite for development of elasto-plastic constitutive model, International Conference on Radioactive Waste Disposal (DisTec 2004), pp.498-507 (2004).
- [3] SKB 社：KBS-3H Complementary studies 2008–2010、 Technical Report TR-12-01 (2012).
- [4] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成23年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術人工バリア長期性能評価技術開発報告書（第1分冊）－人工バリアの長期挙動の評価－ (2012).
- [5] 日本原子力研究開発機構：JAEA 緩衝材基本特製データベース、
<http://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/>
- [6] Komine H. and Ogata N., New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 40, No. 2, pp. 460-475 (2003)

第3章 再冠水時の緩衝材の変質に関わる検討

3.1 Ca型化が緩衝材に及ぼす影響の検討

3.1.1 試験の目的及び概要

放射性廃棄物処分施設の緩衝材は、再冠水の過程で、セメント系材料から溶出するCaイオンによってCa型化することが想定される。このCa型化は陽イオン交換反応と呼ばれ、鉱物の溶解などに比べ、比較的速い化学変質と考えられている。その一方で、湧水が多い地盤の場合、セメント系材料からCaイオンが溶出するよりも速く緩衝材が湧水によって飽和し、その後、拡散によってCa型化することも考えられる。

本試験は、このような、Na型ベントナイトが飽和してからCa型化する場合とCa型化と飽和が同時に生じる場合、Ca型化してから飽和する場合など、Ca型化の進行シナリオによって緩衝材の性能に違いが生じるかどうかを調べることを目的としている。

3.1.2 試験方法

(1) 使用材料

本検討で使用する材料は山形県産のNa型ベントナイト（クニゲルV1）に対して愛知県産のケイ砂3号とオーストラリア産のケイ砂5号を7:1.5:1.5の割合で混合したケイ砂30wt%混合ベントナイトである。ベントナイトの土粒子密度は 2.733Mg/m^3 程度であり、ケイ砂の土粒子密度は 2.65Mg/m^3 程度である。また、クニゲルV1のモンモリロナイト含有率は50~60%程度である。また、Ca型化ベントナイトは上記クニゲルV1を CaCl_2 水溶液で人為的にCa型化させたものを用いた[1]。

(2) 試験ケースおよび試験条件

Ca型化が圧縮ベントナイトの力学挙動に及ぼす影響試験ケースを表3.1.2-1に示す。表には、作製した供試体の乾燥密度、有効ベントナイト乾燥密度の実測値も示している。平成21年度から平成26年度まで実施していたケースでは、通水液を2回変更したり、Case1のみ通水圧を作用させたりしたため、その解釈が困難となった[1]。そこで、現象の解釈のために試験条件をシンプルにした試験ケースを平成27年度より開始した。ただし、平成27年度から開始したケースでは、各ケースの違いを通水液の種類や液種の履歴の違いのみにしたいため、全てのケースに0.1MPaの通水圧を作用させ、また、Case2RとCase3Rでは水液の交換は実施しない計画であるため、定常に至るまでの膨潤圧の推移は同等にはならないことが予想される。表3.1.2-2に供試体諸元を示す。

表 3.1.2-1 Ca 型化が圧縮ベントナイトの力学挙動に及ぼす影響試験ケース

試験ケース	ベントナイト	乾燥密度 Mg/m ³	有効ベントナイト乾燥密度 Mg/m ³	CaCl ₂ 水溶液濃度 mol/l	試験手順 (今後の予定も含む)	試験期間
1	Na 型 (ケイ砂 30wt%)	1.593	1.361	1	① 初期の不飽和状態で蒸留水を通水する。 ② 平衡膨潤圧に達したら通水液を CaCl ₂ 水溶液に交換する。 ③ 透水係数も取得する。 ④ 試験後に含水比、密度計測を実施。	H21 年度 ～ H26 年度
2		1.595	1.363		① 初期の不飽和状態で CaCl ₂ 水溶液を通水する。 ② 平衡膨潤圧に達したら通水液を蒸留水に交換する。 ③ CaCl ₂ 水溶液を再度、通水する。 ④ 透水係数も取得する。 ⑤ 試験後に含水比、密度計測を実施。	
3		1.595	1.363		① 初期の不飽和状態で CaCl ₂ 水溶液を通水する。 ② 平衡膨潤圧に達したら通水液を蒸留水に交換する。 ③ CaCl ₂ 水溶液を再度、通水する。 ④ 透水係数も取得する。 ⑤ 試験後に含水比、密度計測を実施。	
1R	Na 型 (ケイ砂 30wt%)	1.600	1.368	1	① 初期の不飽和状態で蒸留水を通水する。 ② 平衡膨潤圧に達したら通水液を CaCl ₂ 水溶液に交換する。 ③ 透水係数も取得する。 ④ 試験後に含水比、密度計測、化学分析*を実施。	H27 年度 ～ H29 年度
2R		1.600	1.368		① 初期の不飽和状態で CaCl ₂ 水溶液を通水する。 ② 透水係数も取得する。 ③ 試験後に含水比、密度計測、化学分析*を実施。	
3R		1.600	1.368		① 初期の不飽和状態で CaCl ₂ 水溶液を通水する。 ② 透水係数も取得する。 ③ 試験後に含水比、密度計測、化学分析*を実施。	

*【土壌環境分析法第V.7】に則り溶出陽イオン (Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺) 分析を実施、陽イオン交換容量 (CEC) も計測

表 3.1.2-2 試験供試体諸元

Case	1R	2R	3R
土粒子密度	2.740	2.740	2.741
含水調整液種	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
通水液種	H ₂ O ⇒CaCl ₂	CaCl ₂	CaCl ₂
供試体厚さ (cm)	1.989	1.993	1.999
直径 (cm)	6.000	6.000	6.000
体積 (cm ²)	56.24	56.35	56.53
投入質量 (g)	110.18	110.71	110.94
湿潤密度 (g/cm ³)	1.959	1.965	1.963
含水比 (%)	22.43	22.79	22.66
乾燥密度 (g/cm ³)	1.600	1.600	1.600

試験には図 3.1.2-1 に示すような試験機を使用した。設定した試験条件は以下のとおりである。

- 供試体内に間隙の空気がトラップされないように、一方向、一次元に浸潤させる。
- 注水はビューレットによる 1m 程度の水位差で行い、注水する液体は、1mol/l の CaCl_2 水溶液と蒸留水である。排水は集水瓶で集めイオン分析する。
- ケイ砂 30wt%混合 Na 型ベントナイトに CaCl_2 水溶液を適用すると、膨潤しながら Ca 型化が生じるが (Case2R)、ケイ砂 30wt%混合 Ca 型化ベントナイトに CaCl_2 水溶液を通水しても何も変質は生じない (Case3R)。そのため、最終的には、両ケースともケイ砂 30wt%混合 Ca 型化ベントナイトに CaCl_2 水溶液を通水している状態になる。この最終状態に至る膨潤圧の推移を取得する (図 3.1.2-2 参照)。
- ケイ砂 30wt%混合 Na 型ベントナイトを蒸留水で飽和させた後に CaCl_2 水溶液に切り替えるケースも実施する (Case1R)。このようにする事により、膨潤挙動と Ca 型化の影響の関係を取得できる (プレハイドレーション効果、図 3.1.2-2 参照)。
- 通水量を多くして迅速に平衡膨潤圧に達する、かつ飽和状態にさせるために、全ての試験ケースで通水圧を作用させる。平成 26 年度まで実施していたケースでは、Case1 で 0.2Mpa の通水圧を作用させたが、有効応力での膨潤圧がほぼゼロとなったため、その半分の 0.1MPa とした。

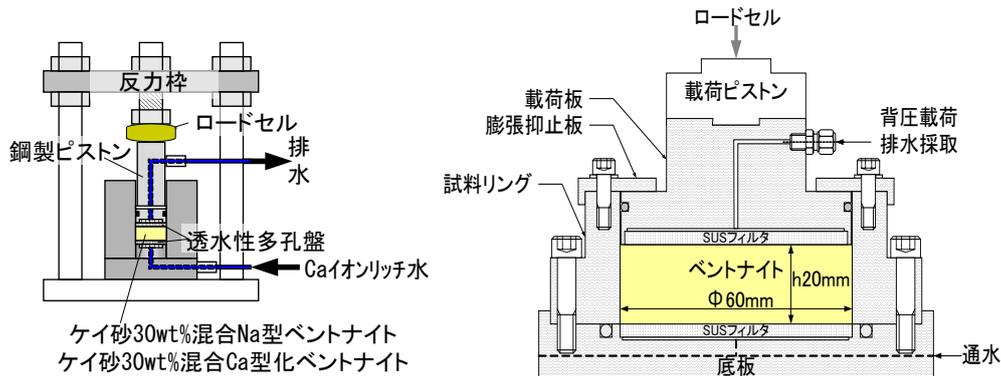


図 3.1.2-1 Ca 型化が圧縮ベントナイトの力学挙動に及ぼす影響試験の詳細図

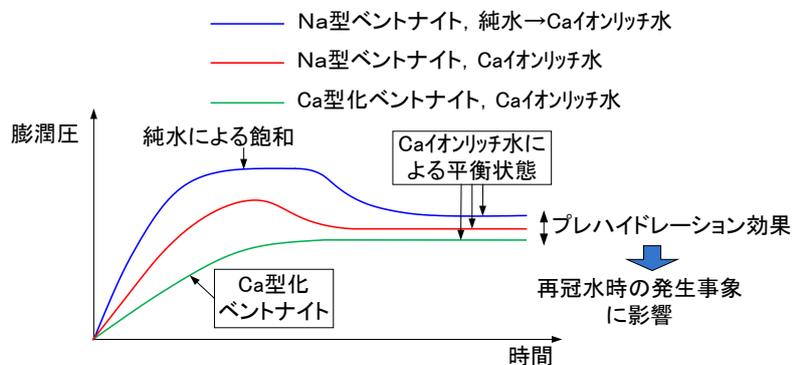


図 3.1.2-2 Ca 型化が圧縮ベントナイトの力学挙動に及ぼす影響のイメージ

3.1.3 試験結果

(1) 膨潤圧の経時変化

図 3.1.3-1 に膨潤圧と通水圧の経時変化を示す。図には、平成 26 年度まで実施していた試験 (Case1~3) における最終値も併せて示している。平成 26 年度まで実施していた試験では、一部の試験ケースのみ加圧通水を行ったが、有効応力としての膨潤圧の評価が困難であったため、試験 Case1R~3R では全てのケースで試験開始から 13 日目以降は 0.1MPa の圧力で通水している。この際に、有効応力としての膨潤圧は低下しているが、これは通水圧を間隙水圧として計測値から減じているためである。この加圧通水の結果、CaCl₂ 水溶液を Na 型ベントナイトに直接供給した Case2R では、加圧給水後に膨潤圧が漸減している。これは、供給した CaCl₂ 水溶液によるイオン強度の増加に伴う膨潤圧の低下と陽イオン交換反応による膨潤圧の変化が徐々に発生しているものと考えられる。このことが正だとすると、給水した Ca イオンが全て Ca 型化に消費されるという仮定や Ca 型化が瞬時に発生するという仮定は実際の現象を単純化したものと考えられる。一方、Case1R では、加圧給水後も膨潤圧が漸増している。Case1R の蒸留水のケースの膨潤圧は CaCl₂ 水溶液を用いた Case2R や Case3R に比べて膨潤圧が最も低いが、これは浸潤速度 (飽和フロントの進行速度) が遅いためであると考えられる。600 日経過した段階で Case1R の膨潤圧が概ね定常状態に達しており、既に供試体の空隙体積の 2 倍程度の給水を行ったため、通水開始から 620 日目に給水していた蒸留水を CaCl₂ 水溶液に切り替えた。液種交換前の膨潤圧の大きさは Case1R < Case2R < Case3R の順であり、平成 26 年度まで実施していた試験 (Case1~3) 結果とは異なるが、Case1R で CaCl₂ 水溶液に切り替えたところ、平成 26 年度まで実施していた試験と同様に Case1R の膨潤圧が減少傾向を示した。

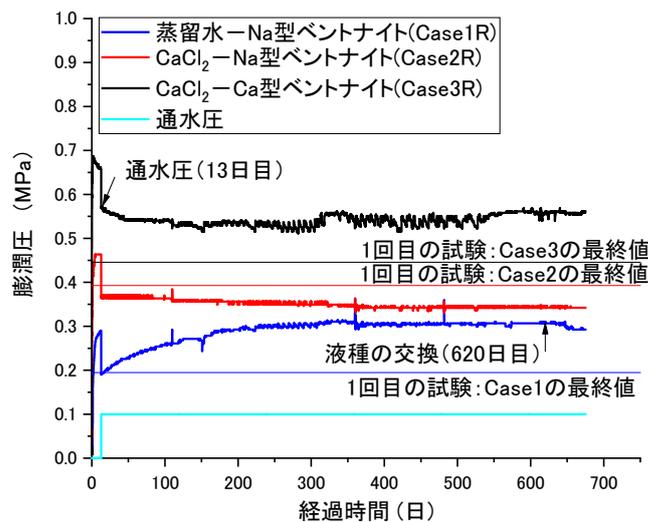


図 3.1.3-1 膨潤圧と通水圧の経時変化

(2) 通水・排水量と排水の化学分析

図 3.1.3-2 に通水量と通水圧の関係を示す。本試験では、加圧通水によって浸潤を加速させている。表 3.1.3-1 には、供給した Ca イオンの当量数の、イオン交換サイトの Na イオンの当量数（表中では CEC と表記）に対する割合を示している。Case1R は給水を蒸留水から CaCl₂ 水溶液に変更しており、変更後の Ca イオンの供給量は 41.95mL であるため、Ca イオンの供給量はイオン交換サイトの 69% であり、不飽和状態で CaCl₂ 水溶液を供給した Case2R（Na 型ベントナイトに CaCl₂ 水溶液を供給）の供給は 202% である。これは供試体のイオン交換サイトの Na イオンの 2 倍の Ca イオンを供給したことを意味しており、仮に通水した Ca イオンが全てイオン交換したとすれば、Case2R はすでに完全に Ca 型化されており、Case3R と同様の状態として Ca 型化したベントナイトに CaCl₂ 水溶液を供給している状態になっていることになる。ただし、前述のように、Case2R の膨潤圧が漸減傾向にあり、通水した Ca イオンが全てイオン交換に寄与したという過程は過剰な評価であると考えられる。

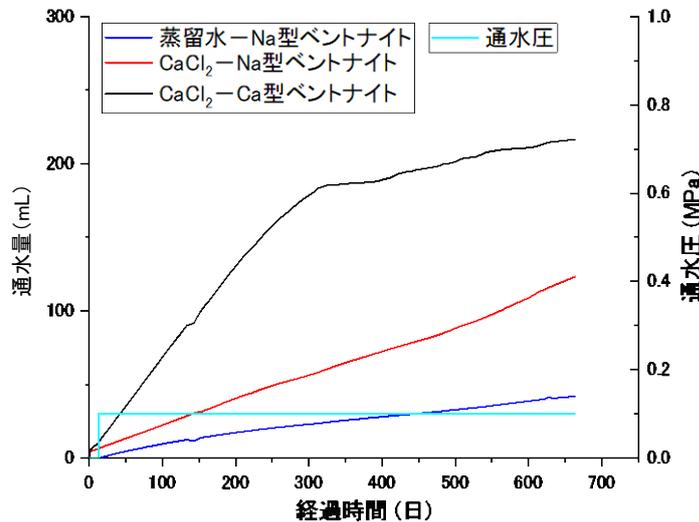


図 3.1.3-2 通水量と通水圧の経時変化

表 3.1.3-1 通水量から算出した Ca 当量/CEC

試験ケース	ケイ砂 30wt% 混合ベントナイト	乾燥密度 Mg/m ³	有効ベントナイト 乾燥密度 Mg/m ³	CaCl ₂ 水溶液 モル濃度 (mmol/mL)	交換性 Na イオン量 (meq/100g)	CEC※ (meq/供試体)	CaCl ₂ 通水量 (mL)	CaCl ₂ の当量 (meq)	Ca 当量/CEC (%)
Case 1R	Na 型	1.600	1.386	0.333	64.2	40.66	41.95	27.94	68.71
Case 2R		1.600	1.386		64.2	40.66	123.25	82.08	201.88
Case 3R	Ca 型化	1.600	1.386		5.47	3.46	216.25	144.02	4162.5

※ 交換性 Na イオンのみが Ca イオンと陽イオン交換反応するとして算出した 1 供試体当たりの CEC

表 3.1.3-2 と表 3.1.3-3 に排水の分析結果を示す。排水は任意の時間収集して、採水した。排水中の各種イオン濃度の経時変化を図 3.1.3-3 に示す。図から、Case2R は、CaCl₂ 水溶液を供給したことによって、排水中の Na イオンの濃度が急増し、その後漸減していることが分かる。これに対して、Ca イオン濃度は漸増傾向を示している。図 3.1.3-4 には、排水中の Na イオンと Ca イオン濃度の関係を示す。モンモリロナイトの層間陽イオンである Na イオンが CaCl₂ 水溶液中の Ca イオンとイオン交換し、Na イオンが間隙水中に排出されるために、Na イオンと Ca イオンの濃度が負の相関関係にあると考えられる。なお、図 3.1.3-4 の Case1R の初期に見られる Na イオンは、ベントナイト中に含まれる鉱物等の溶解の影響であると考えられる。そのため、Case2R についても測定値に溶出した Na イオンが含まれていることが推測される。Case3R については、Ca 型化させる際に洗浄過程が含まれているため、すでに溶出しやすい鉱物は除去されていると考える。陰イオンに関しては、Case2R と Case3R で CaCl₂ 水溶液由来の Cl イオンは一定勾配で漸増している。Cl イオンはベントナイトや随伴鉱物には作用しないと考えられるが、ベントナイトに含まれている水分や吸着していた水と供給液の交換等が影響している可能性はある。もし、漸増が水分、吸着水の影響であれば、その影響が残っている期間は、イオン交換も進行中であると考えられる。また、全てのケースの排水中に有意な量の SO₄ イオンが含まれていることが分かる。この SO₄ イオンは、クニゲル V1 中のパイライトが溶解した際に生成したものと考えられる。この際には Fe イオンも溶離するため、Na イオン濃度の変化にはこのパイライトの影響も含まれるものと考えられる。

表 3.1.3-2 排水分析結果 (mg/L)

Case1R	時間	Si	Na イオン	K イオン	Ca イオン	Mg イオン	Cl イオン	SO ₄ イオン
	日	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
2017/4/14	0	29.2	2730	11.2	18.5	3.2	90.5	4820
2018/1/17	278	19.4	1140	4.8	5.5	0.6	33.4	1190
Case2R								
2016/9/21	0	30.8	8460	37	412	21.3	11600	3680
2017/3/14	174	19.3	7400	40.4	1070	31.1	13500	453
2017/9/8	352	14.1	6590	42.7	2280	42.6	14700	156
Case3R								
2016/5/2	0	25.2	1020	53.8	5200	78.1	9680	882
2016/6/15	44	13.4	644	43.1	6770	81.2	12500	689
2016/8/12	102	8.6	395	33.4	7180	67.3	12700	767
2016/10/7	158	6.5	241	27.4	7460	56.5	12800	780
2016/12/5	217	6.2	161	23.8	7750	50.0	13700	747
2017/7/18	442	6.0	117	22.1	8010	45.8	15100	793
		ICP 発光分光分析法	JIS K 0102 48.3 (2016) イオンクロマト グラフ法	JIS K 0102 49.3 (2016) イオンクロマト グラフ法	JIS K 0102 50.4 (2016) イオンクロマト グラフ法	JIS K 0102 51.4 (2016) イオンクロマト グラフ法	JIS K 0102 35.3 (2016) イオンクロマト グラフ法	JIS K 0102 41.3 (2016) イオンクロマト グラフ法

表 3.1.3-3 排水分析結果 (mmol/L)

Case1R	時間	Si	Na イオン	K イオン	Ca イオン	Mg イオン	Cl イオン	SO ₄ イオン
	日	mmol/L	mmol/L	mmol/L	mmol/L	mmol/L	mmol/L	mmol/L
2017/4/14	0	1.040	118.7	0.286	0.462	0.132	2.553	50.17
2018/1/17	278	0.691	49.59	0.123	0.137	0.025	0.942	12.39
Case2R								
2016/9/21	0	1.096	368.0	0.946	10.28	0.876	327.2	38.31
2017/3/14	174	0.687	321.9	1.033	26.70	1.279	380.8	4.715
2017/9/8	352	0.5020	286.6	1.092	56.89	1.752	414.7	1.624
Case3R								
2016/5/2	0	0.8971	44.37	1.376	129.7	3.213	273.1	9.181
2016/6/15	44	0.4770	28.01	1.102	168.9	3.340	352.6	7.172
2016/8/12	102	0.3062	17.18	0.854	179.1	2.768	358.3	7.984
2016/10/7	158	0.2314	10.48	0.701	186.1	2.324	361.1	8.119
2016/12/5	217	0.2207	7.003	0.609	193.4	2.057	386.5	7.776
2017/7/18	442	0.2136	5.089	0.565	199.9	1.884	426.0	8.254
		ICP 発光分光分析 法	JIS K 0102 48.3 (2016) イオンクロマト グラフ法	JIS K 0102 49.3 (2016) イオンクロマト グラフ法	JIS K 0102 50.4 (2016) イオンクロマト グラフ法	JIS K 0102 51.4 (2016) イオンクロマト グラフ法	JIS K 0102 35.3 (2016) イオンクロマト グラフ法	JIS K 0102 41.3 (2016) イオンクロマト グラフ法

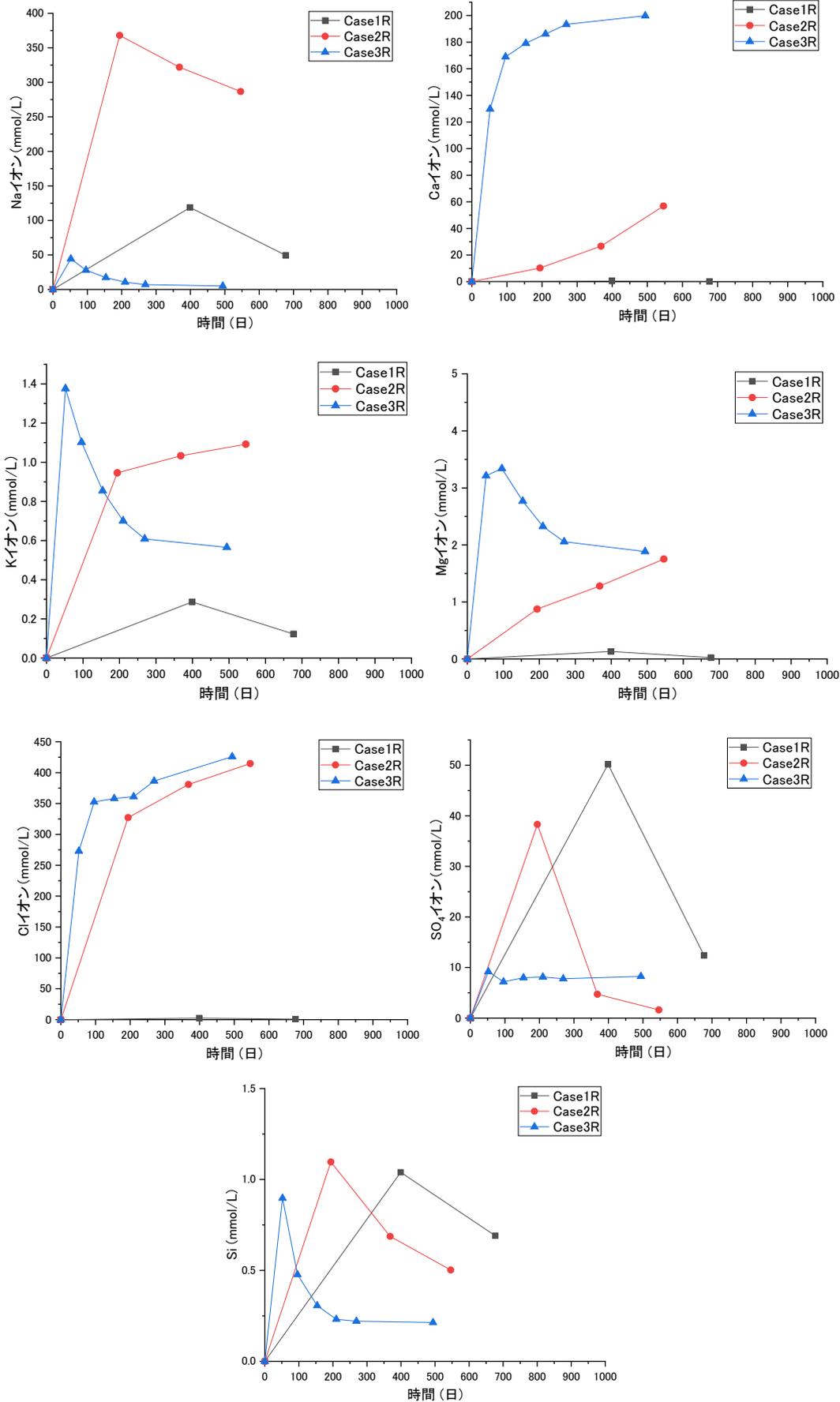


図 3.1.3-3 排水中の各種イオン濃度の経時変化

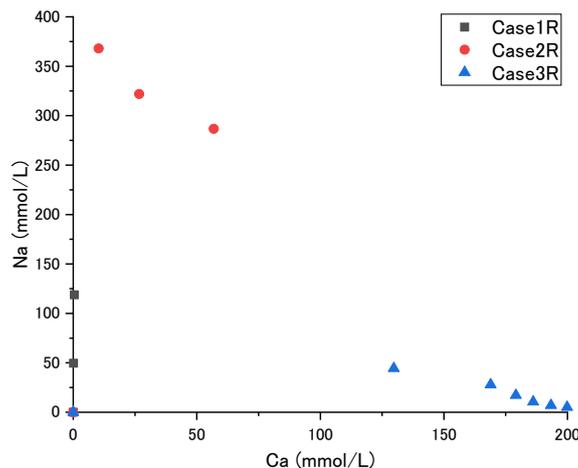


図 3.1.3-4 排水中の Na イオンと Ca イオン濃度の関係

図 3.1.3-5 には、排水中の Na イオンが全て陽イオン交換反応によって排出されたものとして算出した Ca 型化率の経時変化を示す。Case2R は 63%、Case1R は 7%程度であった。Case1R については前述のようにベントナイト中にある鉱物等からの溶出によって供給される Na イオンがあるにも関わらず排水中の Na イオンの量は非常に少なく、Ca 型化が進まない環境であることが示唆される。Case2R に関しては、供給した Ca イオンの当量がイオン交換サイトの約 2 倍であったにも関わらず、排出された Na イオンの当量は 63%であるという結果であり、イオン交換反応に対して供給されるイオンが全て作用するものではないことが明らかである。

図 3.1.3-6 には、排水の質量から算出した透水係数の経時変化を示す。図に示すように、Case2R は Ca 型化が進行しているにもかかわらず概ね透水係数が一定であり、さらに Case1R と Case3R の透水係数は概ね一致している。平成 26 年度まで実施していた試験では、Ca 型化が十分に進んだと考えられる試験終了時点では、全ての試験ケースで透水係数はほぼ同等となり、最終的な透水性はイオン交換の過程によらず、陽イオンの型により同等の値であることが示された。本試験ではベントナイトの Ca 型化が十分に進んでいないことから、最終的な透水性が同等であることは確認できなかった。

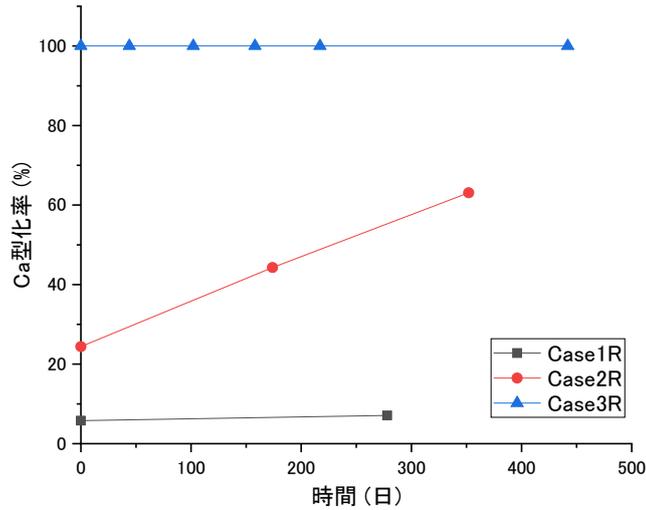


図 3.1.3-5 排水中の Na イオンから算出した Ca 型化率の経時変化

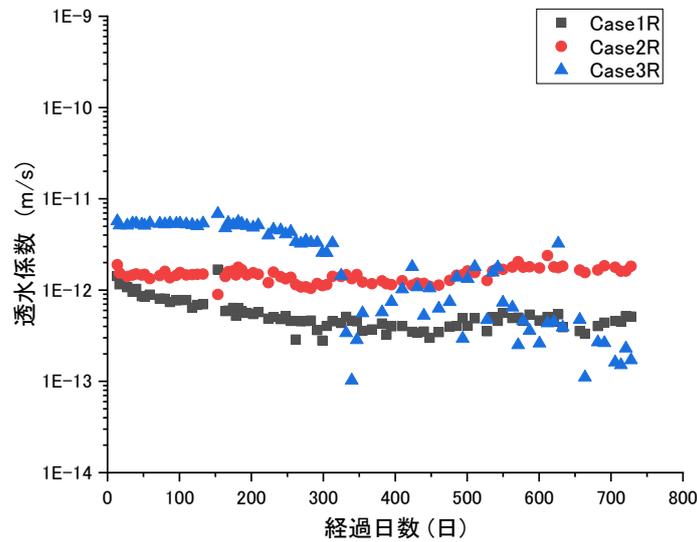


図 3.1.3-6 排水の質量から算出した透水係数の経時変化

3.1.4 まとめ

平成 21 年度から平成 26 年度まで実施していたケースでは、現象把握を重視したために、通水液を 2 回変更したり、ケースによって通水圧を上げたりしたため、その解釈が困難となったことから、現象の解釈のために試験条件をシンプルにした試験ケースを平成 27 年度より開始した。平成 26 年度まで実施していた試験と同様に、ベントナイトを蒸留水で飽和させてから CaCl_2 水溶液を通水するケース (Case1R) において、液種交換後に膨潤圧が減少傾向を示した。また、供給量から算出した Case1R のイオン交換サイトの Na イオン当量に対する供給した Ca イオン当量の割合は 69%、Case2R は 202%であったのに対して、排水中の Na イオンが Ca イオンを交換したものと仮定して算出した Case1R の Ca 型化率は 7%、Case2R は 63%であった。排水中の Na イオンから算出した Ca 型化率は、排水中の Na イオンがすべて Ca 型化によって層間から陽イオン交換反応によっ

て発生したという仮定から算出しているため過剰な評価ではあるにも関わらず、供給した Ca イオンの量に対して非常に低いことから、Ca 型化が供給されたイオンが全て作用して瞬時に発生するという取り扱いはできないことが明らかであった。特に、先に蒸留水で飽和させてから CaCl₂ 水溶液を通水した場合は、イオン交換が抑制されると考えられ、この事実は平成 26 年度までに行った試験の結果と整合している。

平成 26 年度まで実施していた試験結果も踏まえると、飽和と Ca 型化に対して透水係数は可逆的であるが、膨潤圧は非可逆的という可能性がある。このことは、膨潤圧の大きさが緩衝材に期待する性能の一つである場合、Ca 型化と飽和の発生する順番で膨潤圧が異なる可能性があるということの意味している。今回の試験においても、Ca 型化が進むことにより膨潤圧の上昇が抑えられる可能性が示唆されていることから、この緩衝材の機能の低下に対して対策が必要となる。再冠水期間に Ca 型化が起り得るシナリオを考慮した上で、施工および対策を行う必要がある。

3.2 鉄が緩衝材に及ぼす影響の検討

3.2.1 目的

本業務の目的の一つに、健全な緩衝材の施工方法についての具体的な提言を行うことがある。この目的に対する試験の一環として、施工方法の高度化の検討として吹き付けによる緩衝材の施工試験が行われた。この試験は鋼製の型枠にベントナイトを吹き付けて施工性を確認したものである。施工後には、飽和挙動を把握する試験も行った。その後の解体によって接触部が厚さ 5cm まで変色していることが認められた。また、飽和させる途中で、任意の時間に破過圧を測定したところ、破過圧の低下が認められた。このことから、変色した部分のベントナイトが鋼製型枠からの鉄の溶出の影響を受けていることが推測された。この事象は 2 年足らずの期間で起こったものであり、熱の影響も受けていないため、再冠水期間に鉄と緩衝材が接触することがあれば、容易に起こり得るものと考え、緩衝材の鉄に変質挙動を表面分析、化学分析等により検討することにした。鉄と緩衝材の接触が再冠水期間に起こり得るのは、オーバーパックと緩衝材の隙間への早期の地下水の流入による隙間の充填、PEM (Prefabricated Engineered barrier system Module) 方式で緩衝材を定置した場合の PEM 側からの地下水の浸潤、処分孔への定置の際、あるいは定置後に鉄製の部材が使われる場合などが考えられる。このうち、オーバーパックと接触する場合には熱も作用する。それも含めた比較検討を行うために、別途オーバーパックの腐食試験として行われていた 80℃での長期 (最大 10 年) と、地下環境での腐食試験、地下環境での試験との比較のための中規模の腐食試験のそれぞれ試験後のベントナイト変質、必要に応じて、鉄の腐食についても分析を行った。処分環境においては、再冠水期間に緩衝材が鉄と接する可能性が高いことから、鉄との相互作用による化学変質の把握は重要である。

吹き付け施工後の鋼殻と緩衝材の接触面から水を供給した試験後に得られた緩衝材試料は鉄の溶出による変質があることを昨年度の分析[2]により得ているが、さらに X 線 CT 等で鉄の挙動を確認する。また、変質した箇所のベントナイトの破か圧を小型試験により測定し、未変質、あるいは Ca 型ベントナイトの破過圧と比較する (3.2.3(1))。

二つ目の試料は、還元環境下、80℃で人工淡水、あるいは人工海水中に浸漬された鉄-ベントナイトの小型セルによる接触試料であり、浸漬期間は 10 年以上におよぶものである。鉄の材質は炭素鋼であり、人工バリアの構成部材であるオーバーパックを想定して、溶接部を含んでいる。鉱物的な変質、Fe 型化を分析により確認する。また、緩衝材の変質は炭素鋼腐食生成物の分析結果と合わせて考察する (3.2.3(2)、3.2.3(3))。

今年度、幌延の地下環境でオーバーパックを模擬し、80℃の熱を加えた状態で行われた腐食試験の終了に伴い、オーバーパックと接していた緩衝材試料が得られた。地下環境で複雑な系での緩衝材の変質に関する重要な情報が得られると考えられるため、緩衝材を分析対象とした (3.2.3(5))。さらに、地下環境という複雑な系での試験の現象の理解のために行われた室内での腐食試験後試料の分析によって、比較検討する (3.2.3(5))。

また、地下水の溶存イオンによるイオン交換や変質等についての知見を得るために、海水系地下水の主要イオンである Na 溶液、Ca 溶液、K 溶液、Mg 溶液に浸漬した試験後の試料についての分

析も行う (3.2.3(6))。

3.2.2 変質物質に関する分析方法

(1) 分析対象

分析対象とする供試体の詳細を表 3.2.2-1 に示す。

表 3.2.2-1 分析対象

No.	種類	分析対象	試験期間	試料 ID
1	鉄部接触試料 (施工試験後試料)	ベントナイト	1年 (堆積岩模擬)	Case1
			1年 (結晶質岩模擬)	Case2
2	長期浸漬試料 (今年度解体するもの)	炭素鋼 浸漬液 ベントナイト	10年	MB-ASW10 MB-AFW10
3	長期浸漬試料 (昨年度解体したもの)	浸漬液 ベントナイト	5年 10年	T/M/E-ASW5,10 T/M/E-AFW5,10
4	幌延腐食試験後試料	ベントナイト 浸潤液 間隙水	3年	MM-1(upper) MM-2 MM-3(lower) MM-4(sand) MM-5(sand)
5	室内腐食試験後試料	ベントナイト 浸潤液	2年	IH-A(lower) IH-B IH-C IH-D IH-E(upper)
6	イオン交換試料 (溶存イオンの影響)	ベントナイト 浸潤液 間隙水	41 h	NaCl KCl CaCl ₂ MgCl ₂

昨年度、No.1 の試料についての鉱物学的な分析を行った。この試料は、平成 26 年度までの検討において、吹き付け工法で実規模試験を行った後に、緩衝材の流出に係わる試験を実施した際に破過圧が下降した[1]緩衝材として得られたものである。初期に破過圧を測定した後、体積拘束した状態で給水し、50 日目と 240 日目に破過圧を測定したところ、50 日目には上昇した破過圧が 240 日目には低下した (図 3.2.2-1 参照)。体積拘束した緩衝材が膨潤することによって、緩衝材流出現象を抑制できることを期待したが、結果は逆であった。また、鋼製モールドと接触していたベントナイトは接触面から厚さ 50mm にわたり変色していた。このことより、破過圧低下の原因として、モールドからの鉄の溶出によるベントナイトの化学的な変化が起こったことが推測された。破過圧は、体積拘束を解き、ベントナイトを施工した際に使用した鋼製モールドの壁面に設置した穴から水を

通水して測定した。そのため、ベントナイトが供給された水に溶出した鉄の影響を受けていることが予想された。

緩衝材の破過圧が低下した原因としては、鋼製モールドから溶出した Fe イオンによって、ベントナイトが Fe 型化したこと、ベントナイトの構成鉱物（モンモリロナイト）変質して膨潤機能を失ったこと等が考えられる。そのため、解体によって得られたベントナイトの化学分析や膨潤圧試験を実施して、ベントナイトの鉄の作用による膨潤性能の低下について検討することにした。平成 27 年にこの緩衝材を解体し、鋼製モールドに接する部分を採取した。図 3.2.2-2 に採取の状況を示す。採取した試料の鋼製モールドと接触していた部分（図 3.2.2-3）を分析の対象とした。今年度も、昨年度の結果を基にさらに分析を追加し、鉄との相互作用について言及する。

また、No.2 及び No.3 は常温で 1 年未満の影響と比較するために、圧縮ベントナイトと炭素鋼を接触させたものを還元環境下、80℃で 10 年間、人工淡水あるいは人工海水中に浸漬した試料である。昨年度の分析により、炭素鋼とケイ砂を含有したベントナイトの接触に起こる化学変質は、これまでのベントナイト（モンモリロナイト）単体と鉄との相互作用とは異なっていることが示唆された。今年度も昨年度の分析を補い、さらに新規の 10 年間試験した試料を解体して分析を行う。

また、今年度、幌延の地下環境でオーバーパックを模擬し、80℃の熱を加えた状態で行われた腐食試験の終了に伴い、炭素鋼と接していた緩衝材試料（No.4）が得られた。この試料と比較のため室内試験により、緩衝材と接する炭素鋼の腐食試験も行っており、この試験のベントナイト試料も得られている（No.5）。オーバーパックの腐食を考える上でも、地下環境で複雑な系での緩衝材の変質に関する重要な情報が得られると考えられるため、分析を行い、化学変質挙動を評価する。

さらに、地下水の溶存イオンによるイオン交換や変質等についての知見を得るために、Na 以外の海水中の主要イオンである K 溶液、Mg 溶液を通水した試験後の試料（No.6）についても分析する。

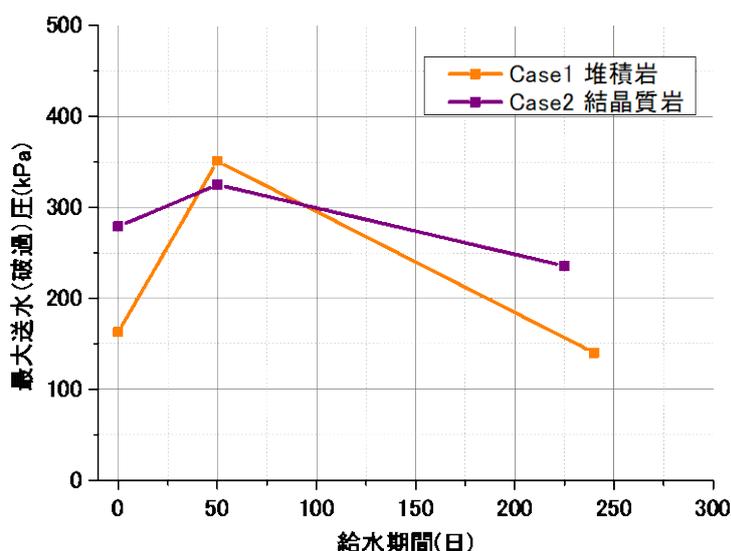


図 3.2.2-1 最大送水圧と給水期間の関係



図 3.2.2-2 ブロックサンプリングによる変質部の採取



図 3.2.2-3 採取した鋼製モールドと接触した試料

(2) 分析項目及び分析方法

分析項目を表 3.2.2-2 及び表 3.2.2-3 に示す。分析項目は、各試験の実施環境を考慮し、必要に応じたものとする。また、昨年度の実施結果[2]に基づき、結果の解釈のための分析を補完する。

表 3.2.2-2 分析項目（液相）

	種類	pH,Eh	液相分析 (主要イオン)	液相分析 (Ni,Cr,Cu,Mn)	全炭素 (IC, OC, TOC)
1	鉄部試料				
2	長期浸漬試料 (今年度分)	○	○	○	○
3	長期浸漬試料 (昨年度分)			○	
4	幌延腐食試験後 試料	○	○		
5	室内腐食試験後 試料	○	○		
6	イオン交換 試料	○			

表 3.2.2-3 分析項目（固相）

No.	種類	分析対象	EPMA	FESEM-EDS	μ -XRD	XRD (湿度制御)	層間陽イオン (CEC)	FETEM-EDS	ラマン 分光	XRF	X線 CT	XRD (リートベルト)
1	鉄部接触試料	ベントナイト									○	
2	長期浸漬試料 (今年度分)	炭素鋼	○	○					○		○	
		ベントナイト	○	○	○	○	○	○		○	○	
3	長期浸漬試料 (昨年度分)	ベントナイト						○				
4	幌延腐食試験 後試料	ベントナイト	○	○	○		○			○		
5	室内腐食試験 後試料	ベントナイト	○	○			○					○
6	イオン交換試料	ベントナイト	○	○			○					○

以下に、それぞれの分析方法を示す。

1) EPMA 分析

電子線プローブマイクロアナライザー(EPMA, JEOL JXA-8200)により、元素の分布を原則、マッピングモードで測定した。測定元素は、緩衝材の変質の程度に応じて、鉱物組成を検討できる元素(Si, Al, Ti, Fe, Cr, Ni, Cu, Mn, Mg, Ca, Na, K, S, Cl, C, O)を対象とした。炭素鋼試料については、接触面の Co についても分析項目に含めた。

2) FESEM 観察及び EDS 分析

EDS 搭載電界放出型走査電子顕微鏡(FESEM-EDS, JEOL JSM-6700F)により微細部を観察(産状観察)し、変質鉱物の生成の有無を確認し EDS により化学組成を分析した。

3) XRD 分析

X 線回折計(XRD, Bulker D2 Phaser)を使用して、完全不定方位処理を行ったベントナイト試料の測定を行い、モンモリロナイトの層間距離の変化の評価、あるいはリートベルト解析によって変質割合を評価した。試料は鉄接触部を含む厚みの既知のベントナイト片をカラムなどから切り取り、真空乾燥後に一定量を分取して粉碎した後に、メノウ乳鉢上でセメダインCとアセトンで希釈しながら混練して均質化し、完全不定方位処理したものとして用いた。測定データについては、リートベルト解析ソフト(Bulker, TOPAS)を用いて変質量を定量評価した(図 3.2.2-4)。

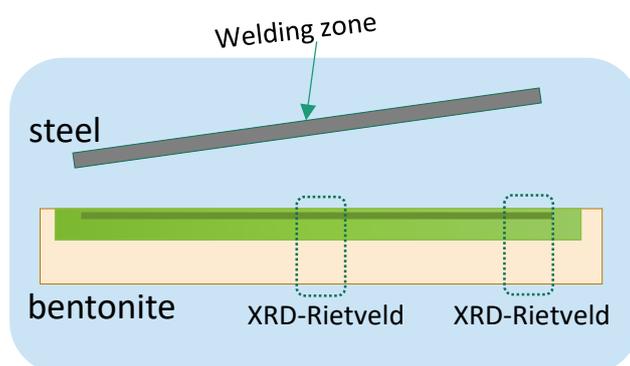


図 3.2.2-4 XRD 分析の対象部位

4) マイクロ XRD 分析

対象試料について微小部 X 線回折計(μ -XRD, Rigaku RINT Rapid)を使用してデバイシェラーリングを測定し、炭素鋼の表面(表面からカッターで削り取って回収)、生成した変質鉱物、あるいは変質したモンモリロナイトについて解析し同定した。

5) XRD 分析(湿度制御)

湿度制御環境での XRD 定方位分析を行い、層間陽イオン組成と層間距離の関係を評価した。

6) 陽イオン交換量

モンモリロナイトの層間陽イオンを従来法、及び元素分析(FESEM-EDS による)により測定したモンモリロナイトの構造式から陽イオン交換容量の定量を行った。

7) FETEM-EDS

変質が顕著な試料は、EDS 搭載電界放出型透過電子顕微鏡(FETEM-EDS, JEOL JEM-

2100F) により、結晶粒子の超微細観察、組成分析、電子線回折パターンの解析などの詳細な分析を行った。対象とする試料は、炭素鋼に付着しているケイ酸塩鉱物であり、真空乾燥した炭素鋼の腐食界面から削り落としてエタノール分散し、マイクログリッド上に滴下して観察試料とした。

8) ラマン分光分析

腐食生成物の化学形態を取得する。分析は Ar ガス雰囲気グローブボックス内でガラスバイアルに密封した状態で行った。

9) XRF 分析

蛍光 X 線分光分析装置(XRF, JEOL JSX-3100RII)を用いて、ベントナイト試料の全岩化学組成を、地質標準試料を用いた検量線法により、SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅について分析し、ベントナイト試料全体の化学変質情報を取得した。

10) Nano-XCT による観察

ナノフォーカス X 線 CT 装置(UNi-HiTE System XVA-160α)を用いて、大気の侵入を遮断したフィルム内に封じたカラム内試料の測定を行い、画像解析から変質状態の評価を行った。

11) pH, Eh 測定

浸漬液を対象に実施した。測定は全て Ar 雰囲気グローブボックス内で実施した。

12) 液相分析

液相分析は、浸漬液を対象に実施した。液相分析の項目は、pH, Eh, Na, K, Ca, Mg, Si, Al, Total-Fe, Cl⁻, SO₄²⁻、および全炭素(TOC, IC, OC)とした。主要陽イオンについては ICP-AES (Hitachi PS3520UVDD II)、陰イオンについてはイオンクロマトグラフィー(Dionex ICS-1600)により測定した。また、全炭素は TOC 計(Shimadzu TOC-5000A)を用いた。微量であることが予想される Ni, Cr, Cu, Mn の溶存量については、ICP-MS(Agilent 7800)によって測定した。

3.2.3 鉄との接触による変質に関する分析結果

(1) 鉄部接触ベントナイト試料 (施工試験後試料)

鋼製モールドと接触したベントナイトについては、図 3.2.2-3 に示したように、直方体に切り出したベントナイトを対象とした。昨年度の試験で回収されたベントナイトブロックは無酸素状態で保存されており、その試料の炭素鋼接触界面を新たに切り出し、接触面と変色している部分切り出してナノ X 線 CT 測定、および化学変質による膨潤性能低下の検証に供した。

1) ナノ X 線 CT 測定

真空パックして X 線 CT 測定用試料として調整したベントナイトブロック試料を測定用ホルダーに固定し、ナノ X 線 CT 装置、UNi-HiTE System XVA-160αによって、90 kV, 60 mA の条件で X 線を照射し、360°回転させて透過像測定したものを再構成してトモグラフィーを取得した。空間分解能は 22.375 μm/pixel である。測定結果を図 3.2.3-1 と図 3.2.3-2 に示す。両試

料とも接触界面に薄い Fe 水酸化物由来の輝度の高い膜を伴っているが、Case1 試料では内部にも輝度の高い領域が確認でき、沈殿がたまっている部分が存在していると思われる。界面近傍の 8 mm 程度の範囲は内部よりもやや明るいゾーンであり、Fe の存在を反映していると考えられる。一方で、Case2 試料では、界面から内部 15 mm 程度に達する亀裂が複数見られるが、沈殿の溜っている部分は確認できず、界面の輝度の高いゾーンも 5 mm 程度であった。

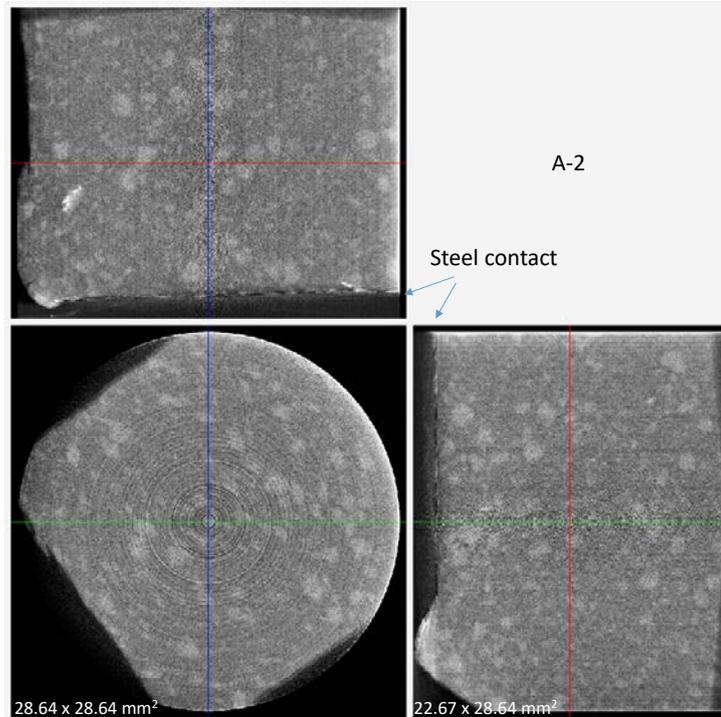


図 3.2.3-1 通水試験試料 Case1 の炭素鋼接触界面近傍の X 線 CT 測定結果

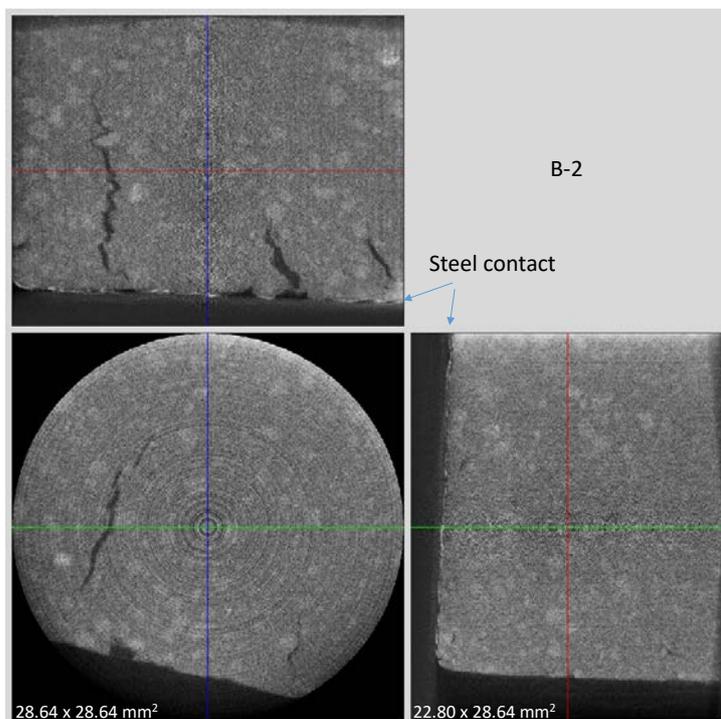


図 3.2.3-2 通水試験試料 Case2 の炭素鋼接触界面近傍の X 線 CT 測定結果

2) 化学変質による膨潤性能低下の検証

a 試験の概要

本検討では、ベントナイトの破過圧と膨潤圧の関係がベントナイトの変質によって影響を受けるかどうかを確認する試験を行った[2]。昨年度の試験の結果、有効膨潤圧において、変質部ベントナイトの膨潤圧が、健全部のベントナイトの膨潤圧よりも小さいために、ベントナイトの乾燥密度から想定される平衡膨潤圧よりも低い通水圧で破過が発生したことが推察された。

本年度は、試験装置のセル部をアクリル製にした装置（図 3.2.3-3）を一部のケースに適用して、破過発生時のペDESTALと供試体との界面を観察することも目的としている。さらに、実際の処分場の再冠水期間において、破過が発生する可能性が高い不飽和状態での破過についても検討を行った。これは、図 3.2.3-4 に示すように、飽和した緩衝材では、透水係数が低いために水圧上昇に対して排水が十分に遅いと考えられる。この場合、間隙水が非圧縮性となし難く、緩衝材自体の体積変化が生じ難く、破過（水圧作用面の変形による隙間の形成）は発生しにくいと考えられる。一方、緩衝材表面（水圧作用面）近傍のみが飽和した状態で、緩衝材深部がまだ飽和していないような状態では、水圧の上昇に対して緩衝材表面近傍の飽和領域は、前述の通り体積変化しないが、深部の不飽和領域では間隙空気が圧縮する、もしくは排気されるために緩衝材全体としては変形できることになる。この場合、水圧作用面が水圧上昇によって容易に変形できることから、破過が発生しやすいと考えられる。このように、破過の発生の有無を考える場合に飽和度の影響は無視できないと考えられることから、今年度の検討に追加した。

試験の対象は、Na 型ベントナイト、Ca 型ベントナイト、および、図 3.2.3-3 に示す昨年度サンプリングした供試体から土槽界面の変質部分を集めた試料とする。試験ケースを表 3.2.3-1 に示す。Case1 は実規模で注水する際に堆積岩を模擬するために注水孔を 27 孔設け、1 孔当たりの注水量を少なくした試験、Case2 は結晶質岩を模擬して、注水孔を 3 孔として大流量の注水をした試験である。なお、後述する試験結果では、表中の記号と各ケースが対応している。

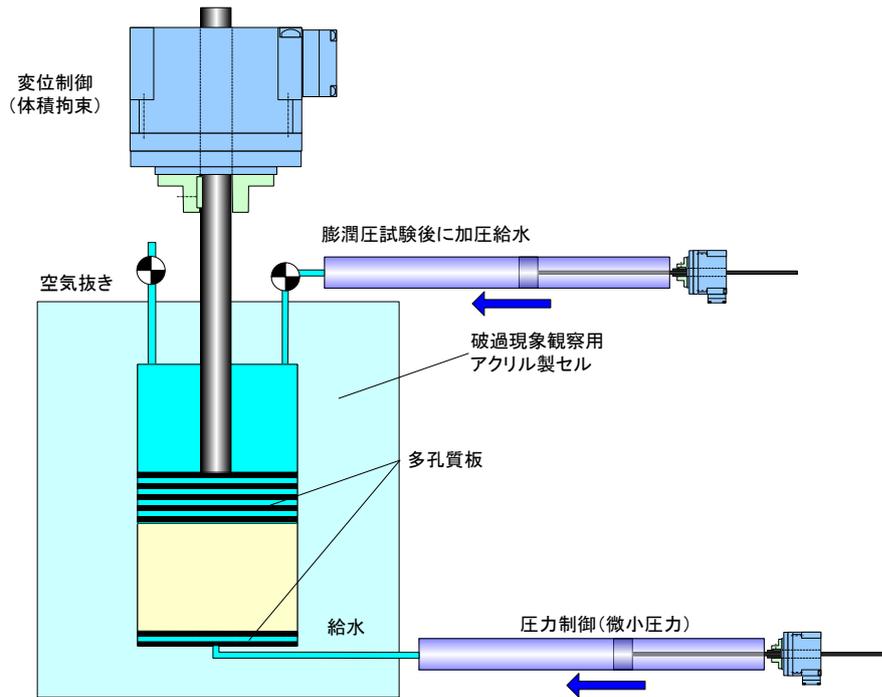


図 3.2.3-3 改良型破過圧試験装置イメージ

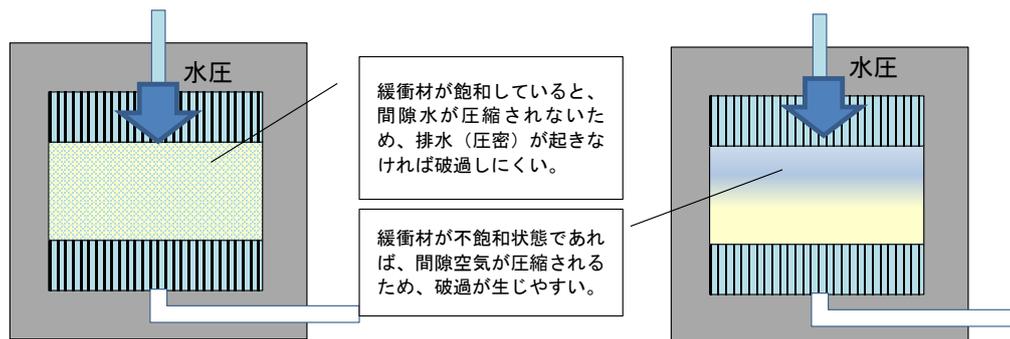


図 3.2.3-4 破過に対する飽和度の影響のイメージ

表 3.2.3-1 変質ベントナイトの膨潤圧と破過圧の関係取得試験

供試体	密度	液種	最大通水圧	計測項目	試験項目		記号
					再現性確認	飽和度影響	
Na 型 ベントナイト	1.2Mg/m ³	H ₂ O	1MPa 程度	膨潤圧 破過圧	○	○	NaB12
	1.6Mg/m ³				○	○	NaB16
	2.0Mg/m ³					○	NaB20
Ca 型 ベントナイト	1.6Mg/m ³ 程度 (ケイ砂 30wt% 混合)				○	○	CaB16
Case1 試験後 (堆積岩模擬)						○	SRAB16
Case2 試験後 (結晶質岩模擬)						○	CRAB16

b 破過圧の測定

表 3.2.3-2 には、膨潤圧と破過圧の関係取得試験に用いた供試体の諸元を示す。表には一次元排気圧縮試験から得られる飽和点における圧縮圧力の値も示している。

図 3.2.3-5 には、一次元排気圧縮過程の乾燥密度と上載圧の経時変化を示す。図から、すべてのケースで等含水比線を規定する直線部が明瞭であることが分かる。この一次元排気圧縮後に図 3.2.3-6 に示すように吸水膨潤過程に移行した。一次元排気圧縮過程の最終値と吸水膨潤過程の初期値が一致しないのは、吸水過程に移行するまでの時間に発生するリラクゼーションによるものである。ただし、吸水膨潤過程における平衡膨潤圧は既往の見知と比較しても概ね妥当であると考えられる。

表 3.2.3-2 膨潤圧と破過圧の関係取得試験供試体諸元

材料		クニゲル V1 NaB12	クニゲル V1 NaB16	Ca 型化 クニゲル V1 CaB16
ケイ砂含有率	(%)	0	0	30
土粒子の密度	(Mg/m ³)	2.733	2.773	2.708
直径	(cm)	6.000	6.000	6.000
高さ	(cm)	1.000	1.002	1.000
初期湿潤質量	(g)	48.94	56.51	56.23
初期湿潤密度	(Mg/m ³)	1.731	1.995	1.988
初期含水比	(%)	44.24	24.92	24.30
乾燥質量	(g)	33.93	45.24	45.24
乾燥密度	(Mg/m ³)	1.200	1.597	1.600
間隙比	(---)	1.28	0.74	0.69
初期飽和度	(%)	94.7	93.9	96.0
一次元排気圧縮圧力	(kPa)	337.5	1996.9	986.9
容器素材		鋼製	鋼製	鋼製

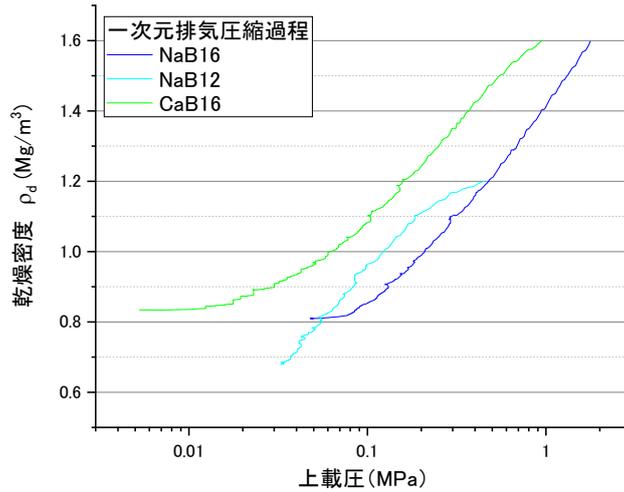


図 3.2.3-5 一次元排気圧縮過程

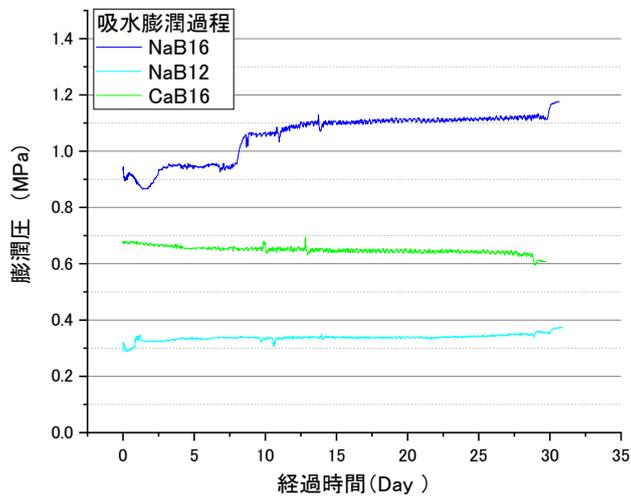


図 3.2.3-6 吸水膨潤過程

図 3.2.3-7 には、破過試験における通水圧と膨潤圧の経時変化を示す。破過試験の水圧上昇速度は 5 分で 3MPa に達するように制御したが、実際の上昇速度は 621.4kPa であった。図に示すように、昨年度と同様にケイ砂 30wt% 混合の Na 型ベントナイトを乾燥密度 1.6Mg/m³ にしたケース (NaB16) において、図 3.2.3-6 に示した平衡膨潤圧よりも大きな通水圧を作用させても全応力の膨潤圧はゼロとならなかった。他のケースは膨潤圧がゼロとなった。図 3.2.3-8 には、通水圧と膨潤圧の関係を示す。図から、いずれのケースも、平衡膨潤圧よりも大きな通水圧を作用させた時点で全応力の膨潤圧がゼロとなっていることが分かる。

ここで昨年度と同様に、膨潤圧から通水圧を差し引いた有効膨潤圧で整理すると図 3.2.3-9 と図 3.2.3-10 のようになる。図 3.2.3-9 には、破過試験における通水圧と有効膨潤圧の経時変化、図 3.2.3-10 には、通水圧と有効膨潤圧の関係を示している。図から、すべてのケースで有効膨潤圧がゼロとなっていることが分かる。また、図 3.2.3-10 の有効膨潤圧がゼロとな

る通水圧は、NaB16 で 923kPa、NaB12 で 295kPa、CaB16 で 479kPa であった。図 3.2.3-6 に示した各ケースの平衡膨潤圧が、それぞれ 1120kPa、350kPa、640kPa 程度であったため、概ね整合していることが分かる。なお、吸水膨潤過程ではほとんど通水圧を作用させていないため、全応力と有効応力は一致しており、その際に得られる平衡膨潤圧は、全応力であり、また有効応力でもある。

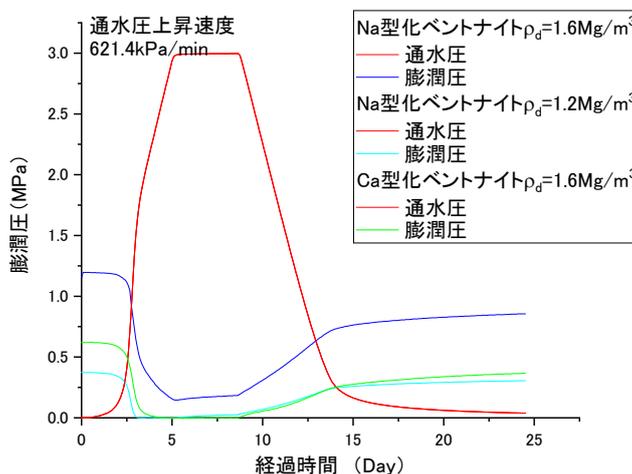


図 3.2.3-7 破過試験における通水圧と膨潤圧の経時変化

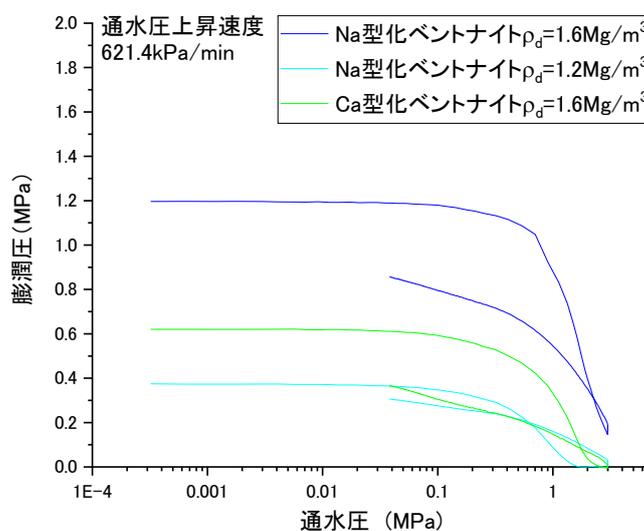


図 3.2.3-8 通水圧と膨潤圧の関係

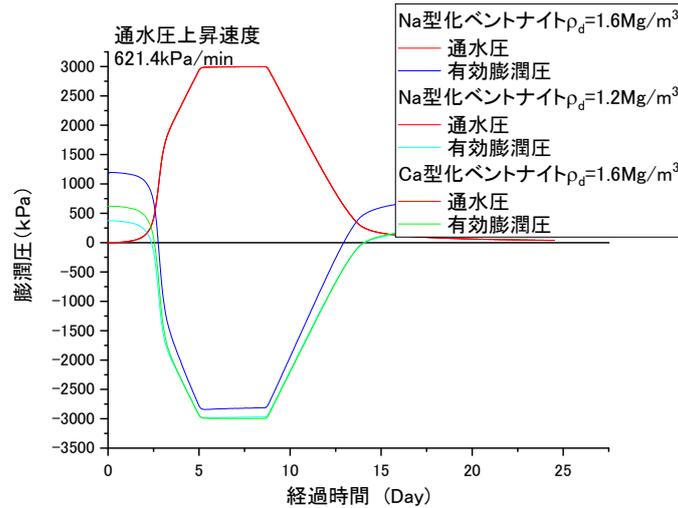


図 3.2.3-9 破過試験における通水圧と有効膨潤圧の経時変化

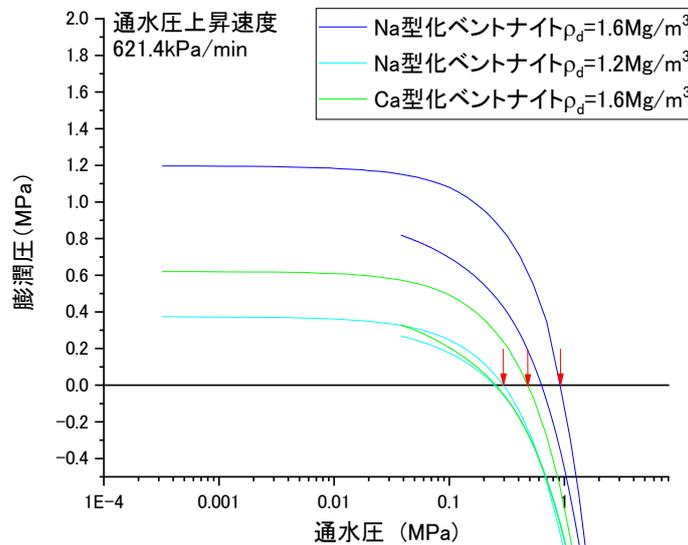


図 3.2.3-10 通水圧と有効膨潤圧の関係

c 破過現象の発生条件に関する検討

これまでの検討で、破過現象の発生が有効応力としての膨潤圧がゼロとなった場合に破過が発生する可能性があることが分かった。この条件が正しければ、通水圧の上昇速度に破過圧が依存する可能性がある。そこで、通水圧の上昇速度が膨潤圧の経時変化に及ぼす影響を検討した。図 3.2.3-11 には NaB16、図 3.2.3-13 には NaB12、図 3.2.3-12 には CaB16 の結果を示す。試験は、破過試験をした後に給水膨潤させ、膨潤圧が一定値になったら同じ供試体で再度試験を行うという手順で行った。

図 3.2.3-11 に示すように、NaB16 では、いずれの場合も全応力の膨潤圧はゼロになっていない。また、1 回目の膨潤圧が非常に大きく、試験を繰り返すごとに平衡膨潤圧が小さくなっていることが分かる。NaB16 は破過していないため、バルクとしては体積一定条件を保っているが、内部構造が試験の度に变化している可能性がある。さらに、通水圧を 3MPa に増

加させた場合の膨潤圧は、1 回目を除いて、上昇速度が小さいほど小さくなる傾向を示している。このことは、有効膨潤圧がゼロになると破過が起これるという条件に反する現象である。

一方、図 3.2.3-13 に示した NaB12 や図 3.2.3-12 に示した CaB16 の結果では、上昇速度が大きいほど膨潤圧は小さくなる傾向を示しており NaB16 の結果と反する結果となった。

これらの結果に鑑みて、破過現象の発生条件として、緩衝材の透水係数と通水圧の上昇速度の関係、緩衝材の乾燥密度と飽和度などの水理と力学の複合的な現象として破過現象の発生が決まることが推察される。つまり、通水圧の上昇速度が緩衝材の透水係数に対して相対的に大きいと通水圧は全応力として緩衝材に作用する。この際、緩衝材が十分に飽和していると通水圧は過剰間隙水圧となって系としては釣り合う。背面から排水されると浸透圧密現象となり供試体が縮むため、破過が発生する。ここで NaB16 のように透水係数が小さいと、すぐには間隙水が排水されず圧密現象が発生しないため、破過試験の実験時間では水で飽和された緩衝材の間隙水圧が上昇したままで破過には至らない。ただし、1 回目の試験の膨潤圧の低下割合が後続するケースに比べて大きいのは、飽和度が低いためだと考えられる。完全に飽和していない緩衝材の間隙水圧が増加すると、間隙の空気が小さくなり、間隙水内に溶存することになる。通水圧が増加すると空隙中の空気はほとんど間隙水内に溶存するために疑似的な飽和状態となり、上記のメカニズムで破過しない。この不飽和状態から疑似的な飽和状態に至る過程で空隙が膨潤圧を緩衝するので膨潤圧は低下すると考えられる。また、繰り返し供試体を破過試験に供すると飽和が進むため、通水圧の上昇速度を上げても破過し難くなると考えられる。さらに、NaB16 のように透水係数が小さい材料の場合に送水圧をゆっくりと増加させると、圧密現象が僅かながら発生するので膨潤圧が小さくなると考えられる。一方、NaB12 や CaB16 のように、比較的透水係数が大きな緩衝材の場合、今回試験で設定した送水圧の増加速度では、間隙水圧の上昇と同時に浸透圧密が起これるため、速度が速いほど膨潤圧の低下が激しいという結果になったと考えれば、試験結果と辻褃が合う。この仮説を確かめるためには、例えば、NaB16 のような透水係数の低い緩衝材で、かつ不飽和状態で破過試験を実施して破過するかどうかを確認する必要がある。元々の吹付け施工した 1/4 リングの緩衝材も破過試験の時に全体が飽和していたとは考えにくく、飽和度の影響も考慮した破過試験を検討する必要がある。

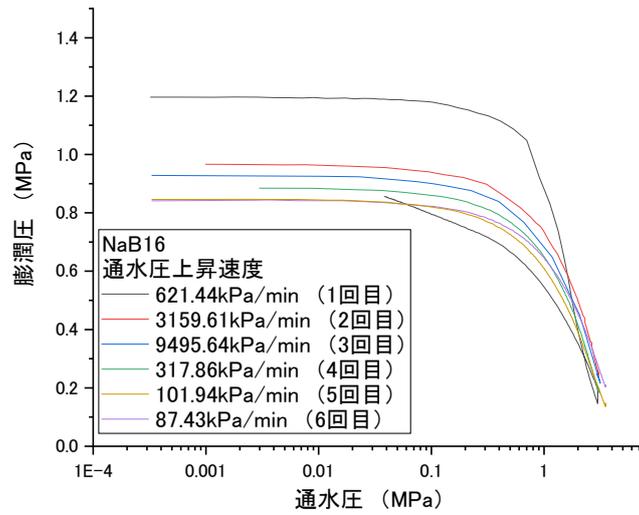


図 3.2.3-11 通水圧の上昇速度が膨潤圧の経時変化に及ぼす影響 (NaB16)

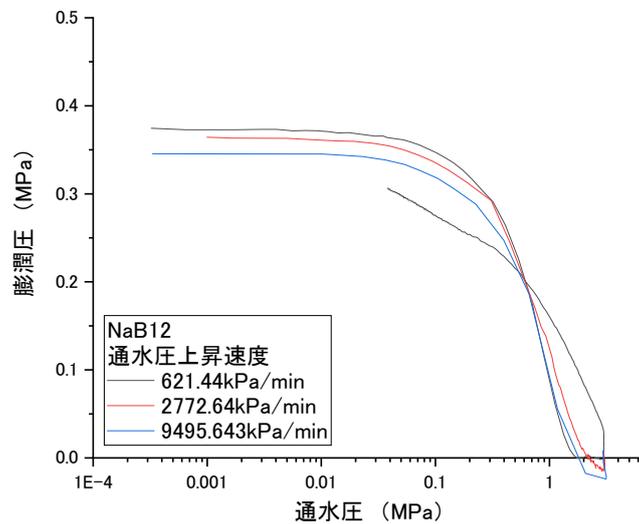


図 3.2.3-12 通水圧の上昇速度が膨潤圧の経時変化に及ぼす影響 (NaB12)

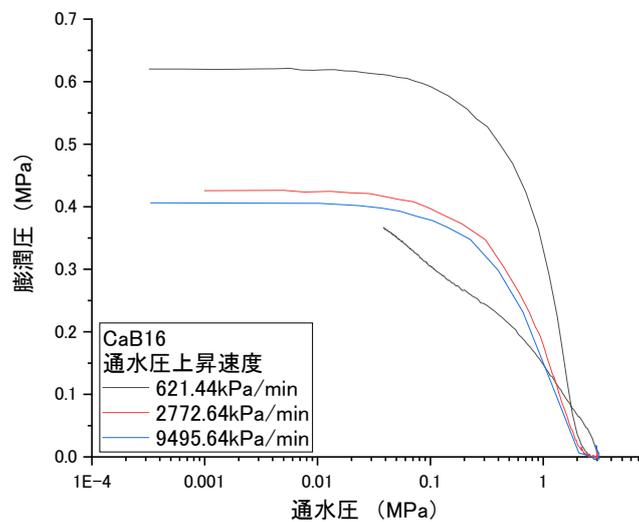


図 3.2.3-13 通水圧の上昇速度が膨潤圧の経時変化に及ぼす影響 (CaB16)

d 飽和度が破過圧に及ぼす影響

飽和度が破過圧に及ぼす影響を調べるために、表 3.2.3-3 に示すような不飽和供試体を用いて膨潤圧と破過圧の関係取得試験を調べた。表には供試体の初期飽和度も示している。すべての供試体で概ね 80%程度の飽和度となっていることが分かる。

表 3.2.3-3 膨潤圧と破過圧の関係取得試験供試体諸元（飽和度影響）

材料		クニゲル V1	クニゲル V1	クニゲル V1	Ca 型化 クニゲル V1	弱変質部	変質部
ケイ砂含有率	(%)	0	0	0	30	30	30
土粒子の密度	(g/cm ³)	2.707	2.733	2.733	2.708	2.707	2.707
直径	(cm)	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
高さ	(cm)	1.000	1.003	1.000	1.000	1.001	1.002
初期湿潤質量	(g/cm ³)	46.55	54.77	62.53	54.64	54.71	54.50
初期湿潤密度	(g/cm ³)	1.646	1.932	2.212	1.932	1.933	1.924
初期含水比	(%)	37.20	20.24	10.57	19.62	20.94	20.48
乾燥質量	(g/cm ³)	33.93	45.55	56.55	45.68	45.24	45.24
乾燥密度	(g/cm ³)	1.200	1.607	2.001	1.616	1.599	1.597
間隙比	(---)	1.256	0.701	0.366	0.676	0.693	0.694
初期飽和度	(%)	80.19	78.94	78.93	78.56	81.78	79.85
一次元排気圧縮強さ	(kPa)	314.9	6558.5	21559.2	2966.2	1367.7	6558.5
容器素材		アクリル	アクリル	SUS	SUS	アクリル	アクリル
加圧過程平均加圧速度 (kPa/min)		3958	3950	4063	3965	3525	10106

図 3.2.3-14 には一次元排気圧縮によって供試体を作製した際の乾燥密度と圧縮応力の関係を示している。図から、全てのケースで等飽和度線の直線部分が表れている。通常は、飽和点を取得すべく、飽和乾燥密度まで圧縮を行うが、本検討では、飽和度を 80%程度とするために、飽和乾燥密度よりも低い乾燥密度で圧縮を終了した。

なお、この飽和度の影響に関する検討では、ベントナイト材料の水分特性曲線が不明であり、前述のような有効応力を明確に規定できないため、応力はすべて全応力であることに注意を要する。

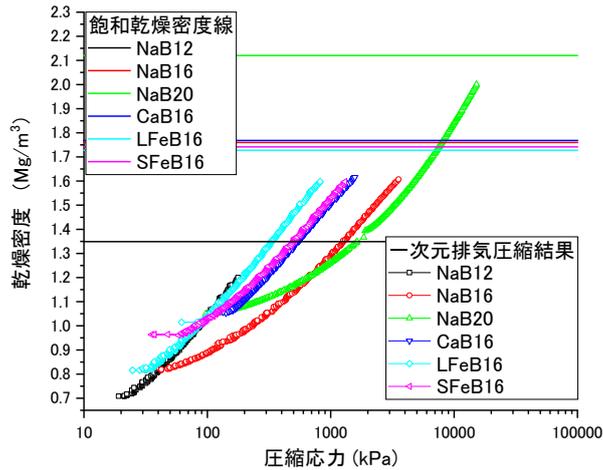


図 3.2.3-14 一次元排気圧縮過程の乾燥密度と圧縮応力の関係

一次元圧縮後に供試体の飽和度が概ね 80%となっており、飽和過程を設けずにすぐに給水を開始した。図 3.2.3-15 には、試験機の給水口から供試体上面のポーラスメタルまでを水で満たす過程の軸応力の変化を示す。不飽和状態で供試体を作製しており、供試体が吸水に伴う軽微なコラプスによって軸応力が減少していることが分かる。ただし、軸応力がゼロにはなっていないため、ペDESTALと一体化したポーラスメタルと供試体の間には隙間は存在しない。

図 3.2.3-16 には、給水圧と軸応力の経時変化を示す。表 3.2.3-3 に示したように、NaB20 と CaB16 は鋼製セルで試験を行ったため、目視による破過発生（ポーラスメタルと供試体間の隙間の発生）の確認は行っていないが、他のケースでは、破過の発生が目視観察で確認できた。図には、目視観察で確認された破過発生時を点線で示している。

図から、水圧は概ね一定速度で増加させているが、水圧の経時変化において、小さなピークが表れた直後に破過が発生する傾向がみられた。これは、供試体が水圧によって圧縮され、ポーラスメタルと供試体間に隙間が発生したため、一時的に水圧が減少したことによるものだと考えられる。この傾向に照らして CaB16 を考えれば、図中の赤字矢印の付近で破過が発生したものと考えられる。なお、破過発生時に軸応力がゼロとなっていない場合が高密度のケースで見られるが、これは、高水圧を作用していることにより、試験機が歪んで応力が発生したためだと考えられる。また、NaB20 については、高密度で軸応力が非常に大きいため、不飽和状態であっても破過は発生しないという結果となった。

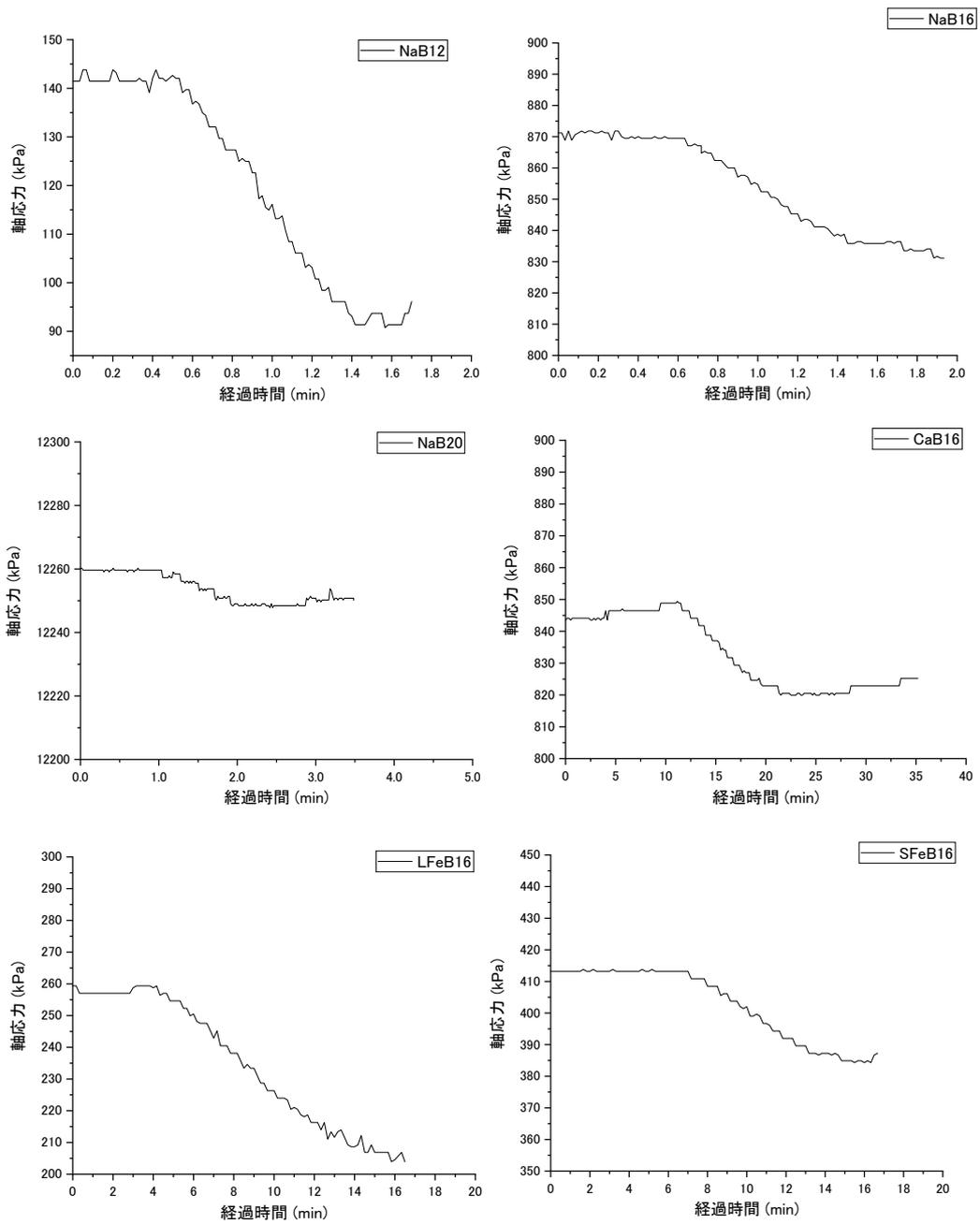


図 3.2.3-15 給水時の軸応力の変化

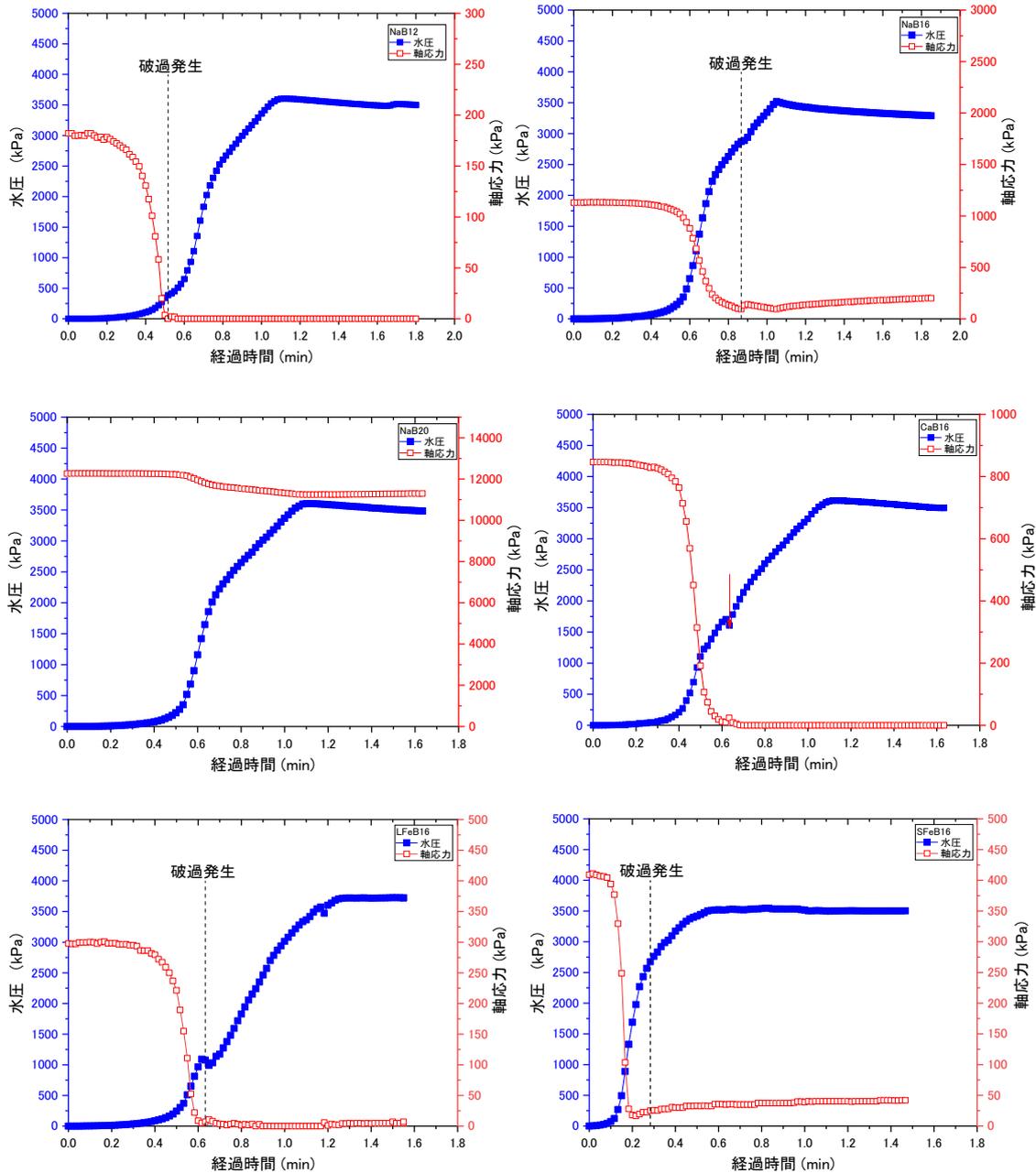
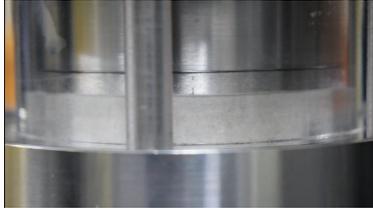
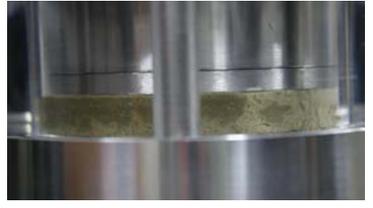


図 3.2.3-16 給水圧と軸応力の経時変化

図 3.2.3-17 には、各材料 (NaB12、NaB16、LFeB16、SFeB16) の破過前後の写真を示す。また、破過後に特異的な現象が観察された場合には終局状態として写真を示した。図から、破過の発生と同時にポーラスメタルと供試体の間に隙間が発生していることが分かる。NaB12 において特に隙間が大きいのは、低密度であるために不飽和領域の剛性が小さいためであると考えられる。NaB16 においては、目視で隙間は観察しにくいですが、破過が発生したと同時にベントナイトがポーラスメタルとセルの隙間に流動したことが観察されており、写真でもポーラスメタルが流動したベントナイトによって見えなくなっている。この流動したベントナイトは、供試体表面の飽和領域が水圧に押し出されたものと考えられる。このため、一時的には供試体表面が流動できる状態であったと考えられることから、ポーラスメタルと

供試体の間には隙間が発生したものと考えられる。また、このケースでは、さらに水圧を上昇させると供試体側面に亀裂の進展が観察された。この亀裂は、水圧上昇に伴って進展しており、破過後の水みち形成に影響を及ぼす可能性がある。さらに、LFeB16 と SFeB16 の両ケースでも破過後に、僅かではあるが、ポーラスメタルと供試体の間に隙間が発生し、その後、供試体の側面に亀裂の進展が見られた。この現象の発生メカニズムの解明には、さらなる検討を要するが、破過試験を可視化できる装置によって、破過現象前後の供試体の状況が明らかとなった。

		変化なし
NaB12 破過前	破過直後	終局状態
		
NaB16 破過前	破過直後	終局状態
		
LFeB16 破過前	破過直後	終局状態
		
SFeB16 破過前	破過直後	終局状態

※NaB20、CaB16 は鋼製モールドで実施したため写真なし

図 3.2.3-17 不飽和供試体の破過前後の状況観察結果

図 3.2.3-18 には、昨年度実施した飽和供試体と不飽和供試体の破過時の水圧の比較を示している。なお、NaB20 については、破過しなかったためプロットしていない。

図から、両者の絶対値は整合しないものの、傾向は概ね一致していることが分かる。このことは、飽和供試体でも、不飽和供試体と同様に、破過に供試体の剛性が影響していることを示唆している。また、図から、変質の程度によっても破過圧が異なることが分かる。これは、変質程度が大きい方が透水係数が大きいため、飽和領域が比較的早く形成され、不飽和領域が小さかったためではないかと考えられる。

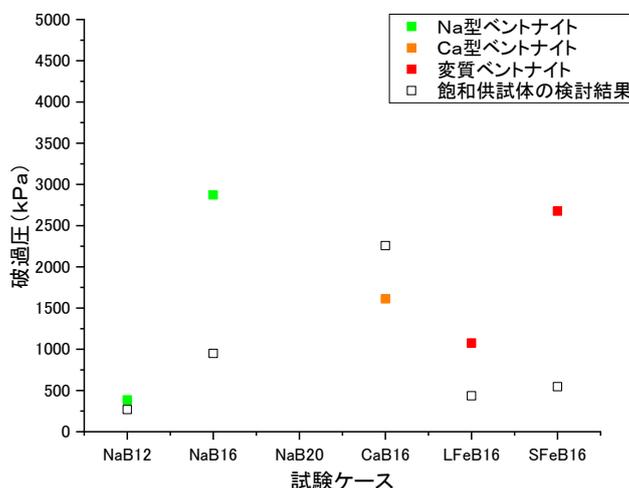


図 3.2.3-18 飽和供試体と不飽和供試体の破過時の水圧の比較

このように、破過圧は、単純に膨潤圧と水圧の大小関係だけで決まるものではなく、不飽和領域の剛性や飽和領域の透水係数などの複合的な要因によって決定することが分かった。実規模 1/4 リングの破過試験において給水時間を長くとした際に破過圧が小さくなった要因も、表面の変質や不飽和領域の変形などの複合的な要因によるものと考えられる。

(2) 長期浸漬試料（今年度解体した試料）

1) 試料の前処理

長期浸漬試料についてはグローブボックス内での反応容器の解体、および充填試料の真空乾燥処理による分離作業によって行った。作業の様子を図 3.2.3-19 に、図 3.2.3-20 に分析に用いた試料を示す。

EPMA 分析に供する試料の調整は、真空乾燥した回収試料（多くはチップ状）をシリコーン樹脂モールド内で両面テープ上に復元固定し、そのままの状態、岩石薄片製作用樹脂ペトロポキシによる真空樹脂含浸固化して行った。90℃加熱して固化した試料は、少量のエタノールを滴下しながらアイソメットにより中央を炭素鋼伸長方向に切断して、炭素鋼接触断面を露出させた。その後、少量のエタノールを用いてバフ研磨し、表面をエアークリーンしたものを実体顕微鏡で確認して、EPMA 用に行う通常炭素蒸着をベルジャー式真空蒸着装置により行った。



図 3.2.3-19 長期浸漬試験試料の回収時の様子



図 3.2.3-20 分析に用いたベントナイト(a: MB4; b: TB6)

2) 浸漬液の pH, Eh 測定

浸漬液を対象に pH および Eh を測定した。測定は全て Ar 雰囲気グローブボックス内で実施した。分析結果は表 3.2.3-4 に示したとおりである。Fe-Si-O-H 系の平衡相 Eh-pH 図にそれらの値をプロットした。

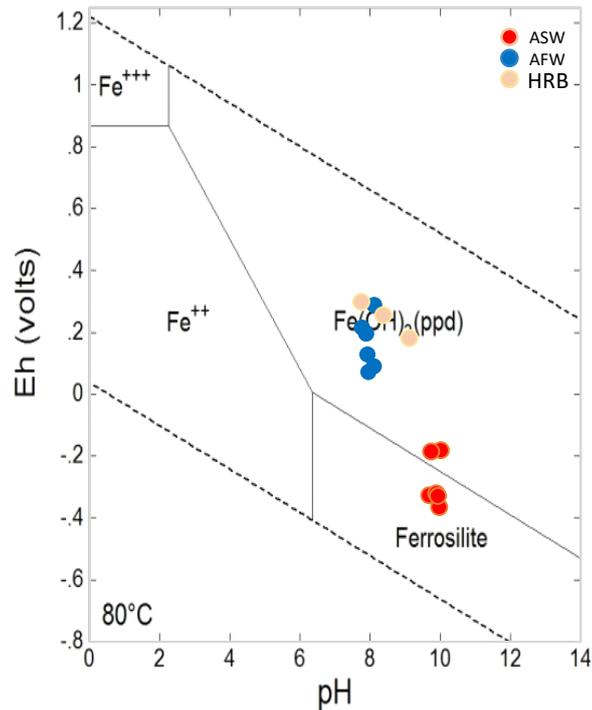


図 3.2.3-21 実験溶液の Eh-pH ダイアグラム (相境界は Fe-Si-O-H@80°Cに基づく)

3) 浸漬液の液相分析

分析結果を表 3.2.3-4 にまとめて示す。

溶接金属に含まれている微量元素の Cu, Cr, Ni, 炭素鋼の Mn は腐食過程における溶接の影響を比較するには良い指標となる。海水系と淡水系では海水系の方が溶脱量は多いことがわかる。また Cr の溶脱は TIG でもっとも多い。MAG と EBW では大きな違いはないと考えられる。

海水系は Eh が高く酸化になるため、炭素鋼は炭酸イオンを生成する。また SO₄ は一部 HS⁻ の還元されるために、溶接金属に含まれる Cu や炭素鋼中の Mn や Ni は CuS や MnS, NiS を生じて溶存濃度は低く抑えられると考えられるが、海水系での Mn の溶出が顕著である。硫化鉱物を作らない Cr も海水系で溶脱量が多くなっている。これら Mn や Cr の濃度は溶接手法には依存せず、海水系で全て 10, 0.01 ppm 近傍の値をそれぞれ示している。

ベントナイト由来の主要溶脱成分である Si, Al について図 3.2.3-24 にプロットを示す。ここでわかるように、淡水系ではベントナイトが溶解しており、特にシリカ成分の溶脱が極めて顕著である。仮にモンモリロナイトが溶解したときにはグラフの直線回帰の勾配は Si/Al = 8/3 = 2.67 近傍になるはずであるが、両溶液系ともそれよりも大きく、淡水系の Si は主に混合されている硅砂の溶解が支配的だと思われる。しかし炭素鋼にも、とりわけ溶接金属に多く Si が含まれており (表 3.2.3-5)、その溶解量も無視できないと思われるが、腐食界面に多くのシリカが認められ、また Fe ケイ酸塩も存在しているため、浸漬溶液への供給の寄与については不明である。

表 3.2.3-4 液相分析結果

No.	Solution	Welding	Duration (y)	ID	pH	Eh (mV)	Si (ppm)	Al	Fe	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	IC	TC	TOC	Mn(ppb)	Cu(ppb)	Cr(ppb)	Ni(ppb)
1	ASW	TIG	5	T5301	7.48	105.2	79.79	0.02	0.07	1093.06	518.07	10304.45	69.39	19476.9	3125.7	0.00	29.52	29.52	10600.0	0.13	6.22	0.17
2		MAG	5	M5300	7.31	189.8	110.28	1.31	0.01	1484.53	284.56	10591.34	78.84	18711.9	2903.5	0.00	30.03	30.03	14460.0	0.22	2.97	0.55
3		EBW	5	E5300	7.44	170.9	88.95	1.49	0.01	1489.13	363.77	11359.67	87.81	19823.7	2863.3	0.00	34.23	34.23	13300.0	0.26	3.04	5.73
4		mother	10	MB4	7.68	261.77	196.22	1.50	0.01	1915.09	477.40	19259.56	455.83	15800.0	3231.0	0.00	162.20	162.20	13142.4	0.46	0.05	0.23
5		MAG	10	M5109	7.67	68.3	109.59	2.35	0.01	1521.23	484.92	10722.60	28.45	21226.2	2315.8	0.00	25.83	25.83	16570.0	0.13	5.01	0.13
6		EBW	10	E5201	7.51	49.8	150.60	0.64	0.12	1434.55	519.87	10417.31	40.94	19604.4	2348.1	0.00	25.49	25.49	17165.0	0.07	5.15	0.07
7	AFW	TIG	5	T5105	9.37	-339.2	244.04	0.37	0.08	1.01	0.03	2938.85	6.25	107.5	334.9	39.95	104.80	64.85	1.4	0.53	0.11	0.21
8		MAG	5	M5303	9.72	-196.7	1624.58	2.71	0.01	1.09	0.01	292.65	0.25	116.5	365.2	14.54	87.40	72.86	1.7	0.48	0.16	0.13
9		EBW	5	E5104	9.42	-200.8	178.26	0.33	0.01	1.07	0.01	304.64	0.39	109.3	389.8	24.48	83.09	58.61	3.5	0.51	0.27	0.18
10		TIG	10	T5202	9.67	-376.7	148.11	0.34	0.04	1.21	0.02	318.22	1.88	123.5	369.4	19.33	95.19	75.86	0.5	1.21	0.78	0.28
11		MAG	10	M5104	9.58	-333.1	1962.97	3.88	0.00	1.06	0.01	270.07	0.43	115.4	317.1	26.46	89.99	63.53	0.9	0.70	0.19	0.03
12		EBW	10	E5202	9.63	-341.0	190.94	0.19	0.01	1.35	0.15	284.05	0.54	124.0	392.7	38.77	99.84	61.07	1.1	0.68	0.29	0.02
13		mother	10	TB4	9.79	188.7	365.35	0.23	0.01	1.30	0.01	525.67	3.72	145.6	571.8	11.83	249.60	237.77	0.7	1.64	0.08	0.23

表 3.2.3-5 炭素鋼と溶接金属の微量成分 (Mitsui et al. 2006)

Steel	C (wt.%)	Si (wt.%)	Mn (wt.%)	S (wt.%)	Cu (wt.%)	Cr (wt.%)	Ti (wt.%)	Ni (wt.%)
MAG and TIG	0.15	0.19	0.36	0.00		0.01		0.08
EBW	0.12	0.25	0.65	0.00		0.00		0.00
Weld metal	0.10	0.73	1.40	0.01	0.24	0.03	0.01	
NOTE:	All data after Mitsui et al. (2006).							

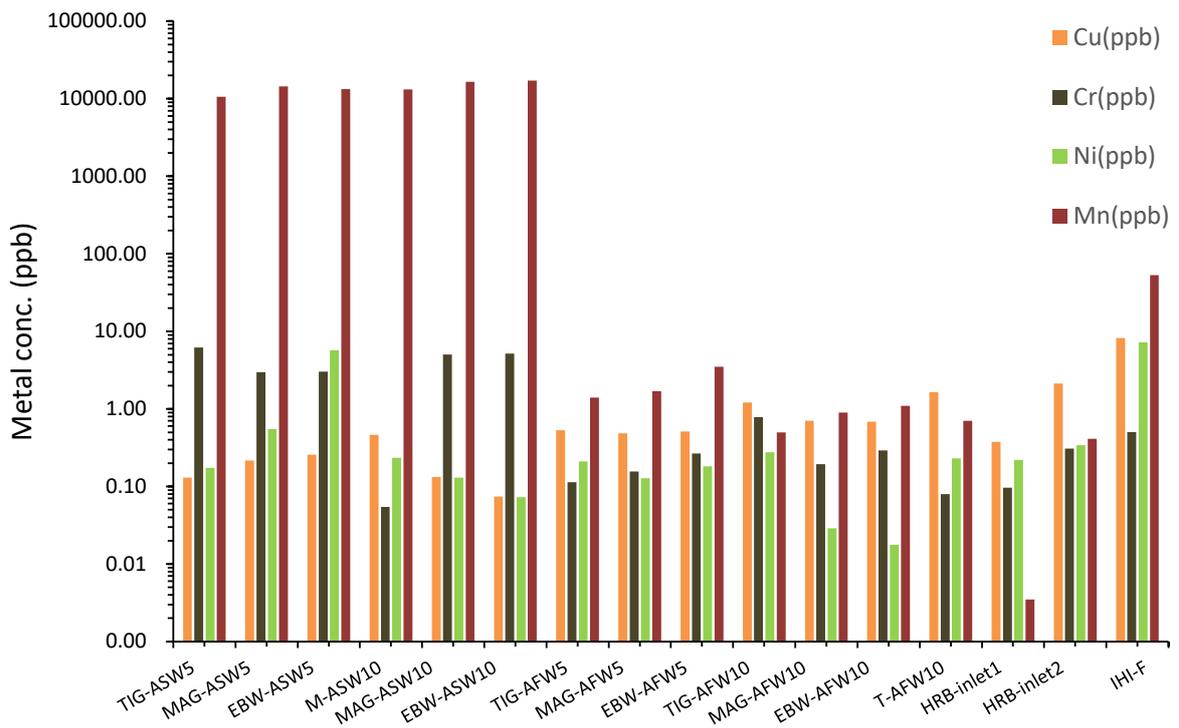


図 3.2.3-22 溶接手法と微量元素の溶脱量の関係

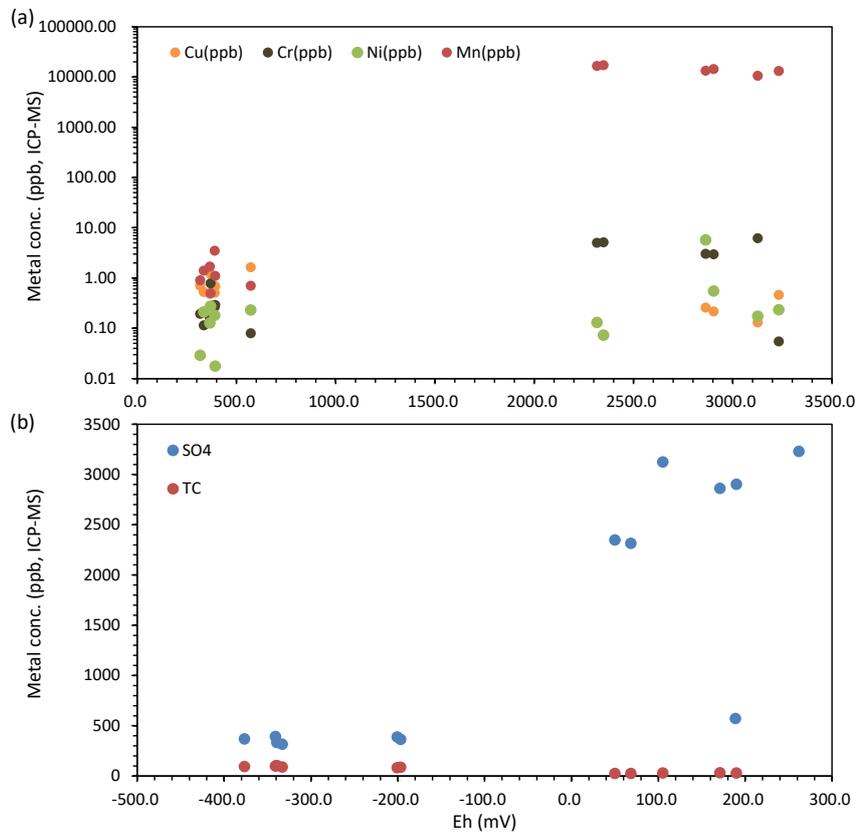


図 3.2.3-23 溶液の Eh に対する金属元素および SO₄ と TOC の関係

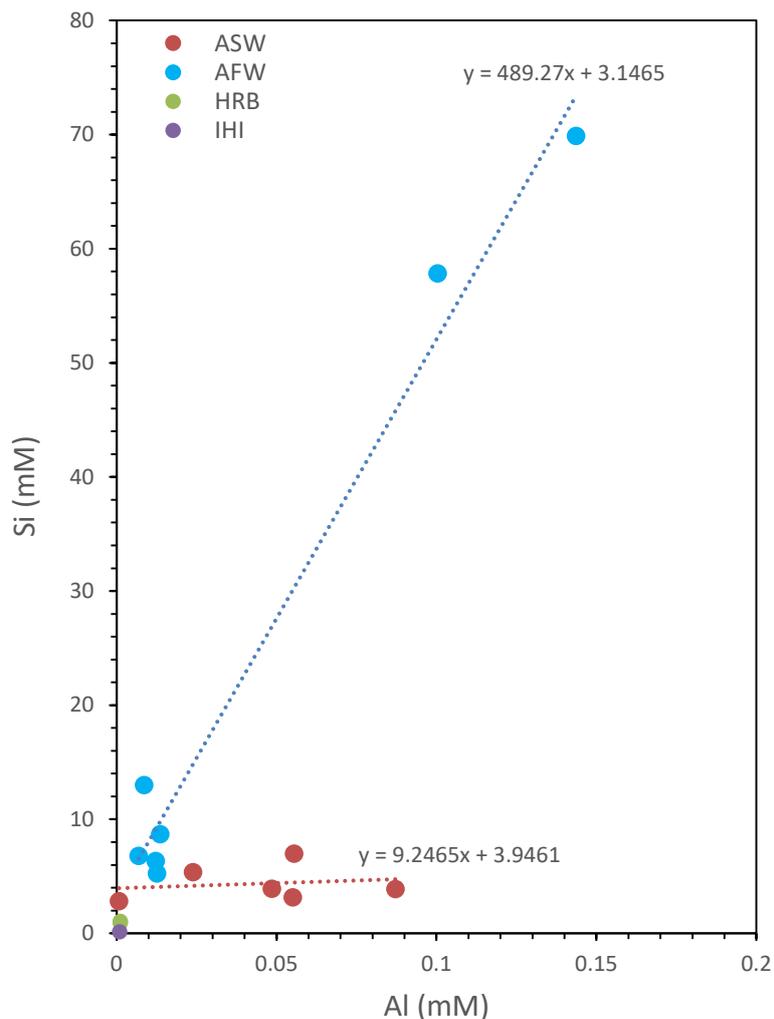


図 3.2.3-24 溶液の Al vs. Si プロット

4) 炭素鋼の水素分析

ベントナイト緩衝材中の炭素鋼片は3枚あり、そのうちの1枚だけは、X線CT測定時の透過像を参考にしながらベントナイトを破損することなく回収した()。炭素鋼はすぐに凍結保存し、水素分析に供した。測定に用いた試料は表 3.2.3-6 に示したとおりである。測定時の水素放出曲線を図 3.2.3-25 に示し、その積分値より求めた水素含有量を表 3.2.3-7 に示す。人工海水浸漬の MB4 試料は人工淡水のその約 10 倍の水素含有量を示し、腐食に伴い水素化(水酸化)がより強く進んだ結果と考えられる。

表 3.2.3-6 炭素鋼試料の重量と水素放出量

No.	試料 No.	重量(g)	放出水素量(wt. ppm)
1	カラム MB4	0.7375	0.33
2	カラム TB6	0.7625	0.29

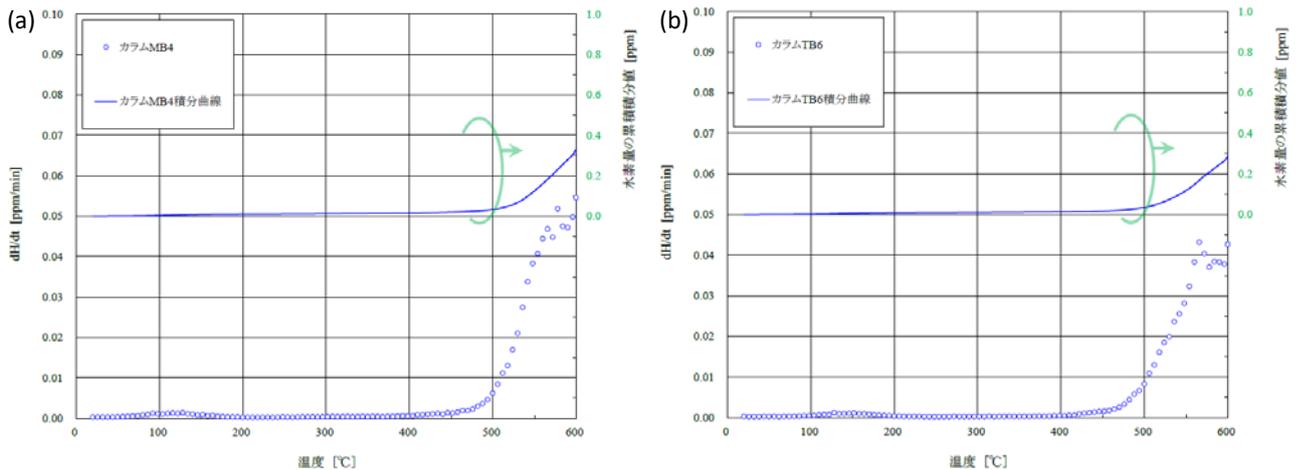


図 3.2.3-25 炭素鋼の水素放出曲線(a: MB4; b: TB6)

表 3.2.3-7 炭素鋼の水素含有量

No.	試験片 No.	全水素量(wt. ppm)
1	カラム MB4	1.9
2	カラム TB6	0.2

5) EPMA 分析

元素の分布をステージスキャンによるマッピングモードで測定した。マッピング分析では、電子線の加速電圧は 15 kV、試料電流値は 20 nA であった。測定元素は、緩衝材の変質の程度に応じて、鉍物組成を検討できる元素(Si, Al, Ti, Fe, Cr, Ni, Cu, Mn, Mg, Ca, Na, K, S, Cl, C, O)を対象とした。炭素鋼試料については、接触面の Co についても分析項目に含めた。マッピングの実スキャン領域は 12x36 mm であり、xy 比が 1:3 の長方形単位ピクセル(1 ピクセルの実サイズは 12x36 μm)によって 1000x1000 ピクセルで取得している。画像編集ソフト (Image-J) を用いて 1000x3000 ピクセルに変換した画像(1 ピクセルは 12x12 μm)を最終的な出力データとした。ベントナイトについては、実スキャン領域は 8x24 mm で、これを 1000x1000 ピクセルで取得し、Image-J を用いて 800x2400 ピクセルに変換した画像 (1 ピクセルは 10x10 μm) を最終的な出力データにしている。

マッピング測定後、ステップワイズのスポット分析をバッチ浸漬ベントナイト試料では炭素鋼接触断面から内部までにおいて 2 ライン (1 ラインの幅は 100 ピクセル) に沿って実施した。さらに、炭素鋼接触部から内部に 1 ラインのステップワイズのスポット分析を実施した。加速電圧 15 kV、試料電流値は 12 nA を用いた。これらの試料においては、およそ 50-100 点程度の分析点であった。測定元素は Si, Al, Fe, Ni, Cr, Cu, Mg, Ca, Na, K であり (通水試験試料の Cu は未実施)、同条件で行った標準試料の測定結果を元に、酸化物 ZAF 補正法により濃度計算して鉍物組成とした。スメクタイトの化学組成は O = 22 に基づき計算した。

a 炭素鋼

凍結乾燥した緩衝剤から回収した炭素鋼試験片（各カラム内に3枚内包、合計6枚）のうち、各カラムについて1枚をそのままの状態ですべての元素マッピングに供した。Fe変質したケイ酸塩に覆われているため、全面は観察できなかったが、比較的ケイ酸塩の少ない領域では、Fe、Mn および S の顕著な検出がなされており、海水の SO_4^{2-} が還元されて生成した HS^- による炭素鋼内の Mn を MnS として沈殿させていると思われる。淡水系試料の AFW10-MB では Mn も S もマッピングでは顕著な強度を示しておらず、この現象は海水系において起こる特異なものと推察される。

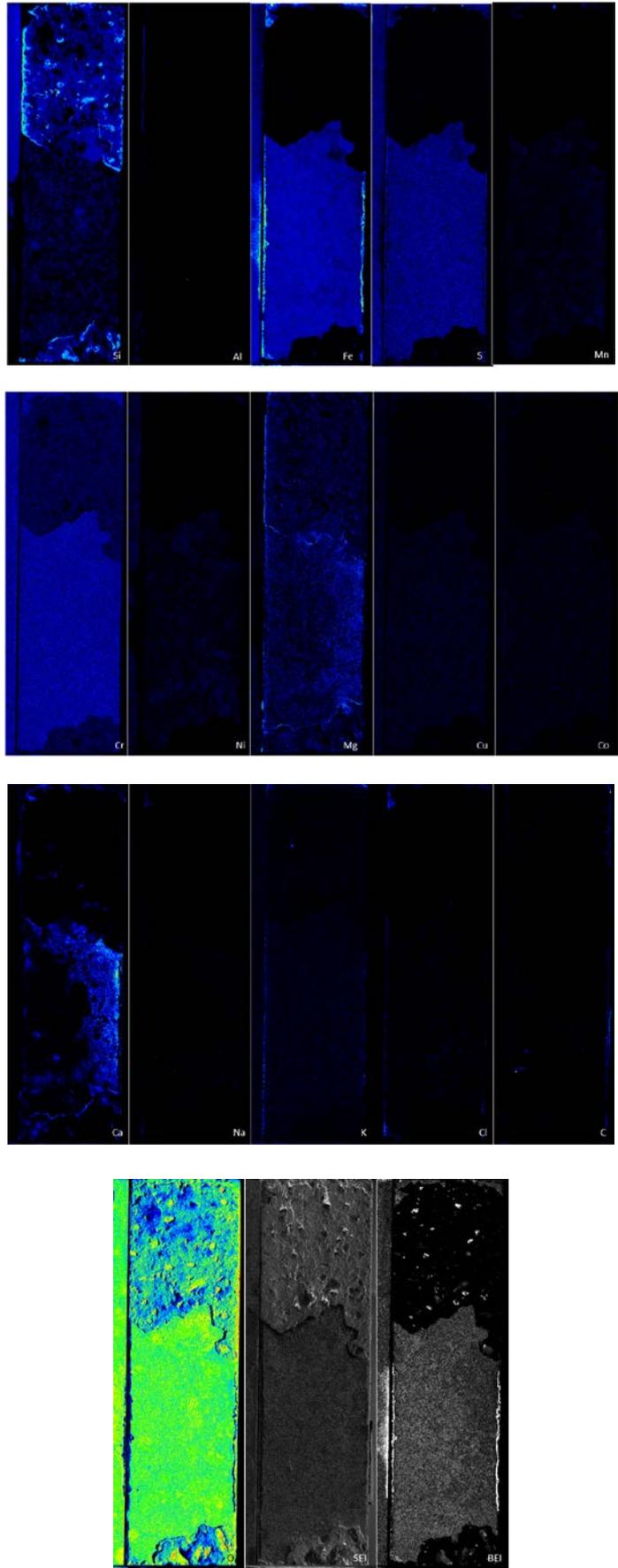


図 3.2.3-26 炭素鋼試験片の EPMA マッピング結果 (ASW10-MB4、12x36 mm²)

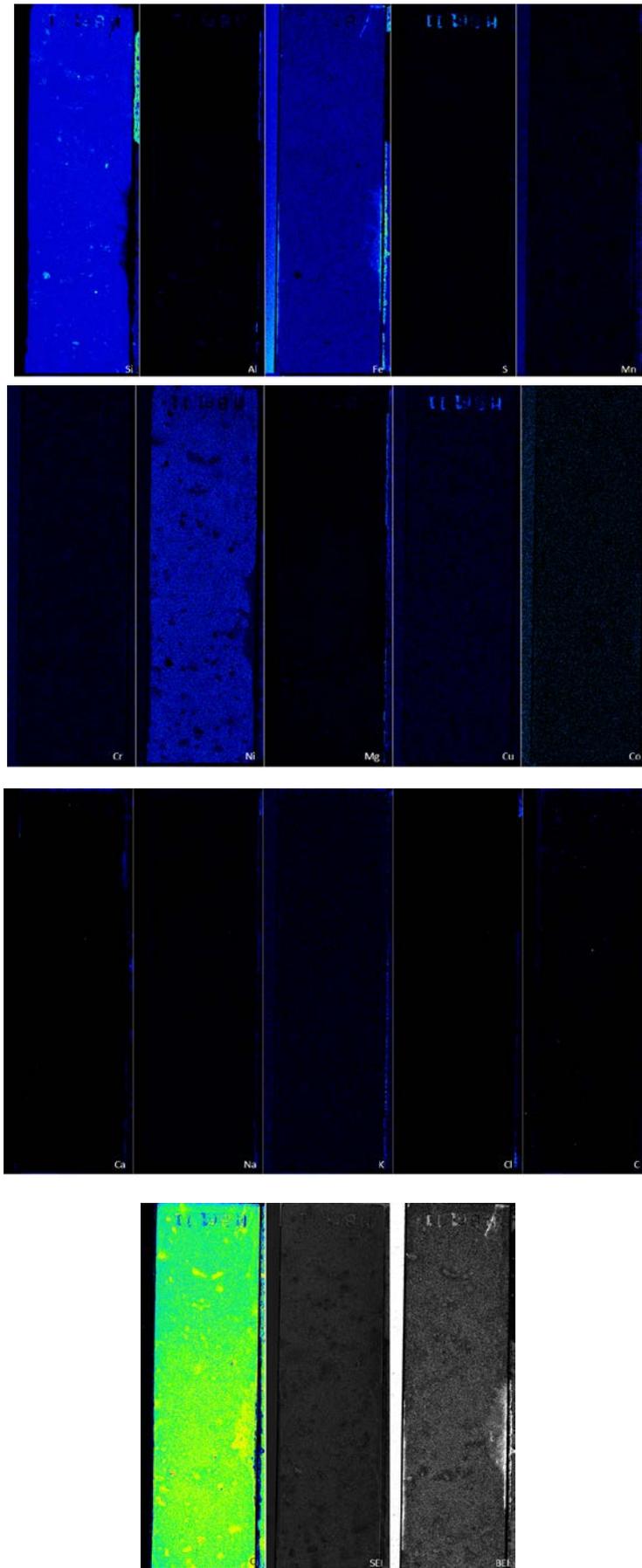


図 3.2.3-27 炭素鋼試験片の EPMA マッピング結果 (AFW10-TB6)

b ベントナイト

炭素鋼と同様に、ベントナイト試料において元素マッピング分析を行った。分析試料は、炭素鋼を挟んで上位側のベントナイトである。炭素鋼接触断面を露出させるため、図 3.2.3-28 に示すラインで切断し、その表面をバフ研磨して炭素蒸着したものを測定に用いた。

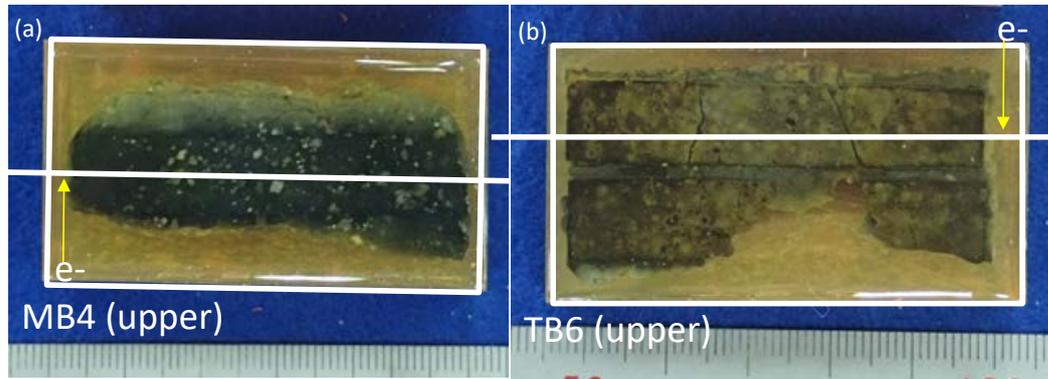


図 3.2.3-28 ベントナイトのマッピング分析に用いた試料の調整(a: MB4; b: TB6)

測定結果を試料ごとに以下に示す。各 Fe マップ中の白枠は強度プロファイル取得領域 (100 ピクセルを平均) である。

(a) ASW10_MB4

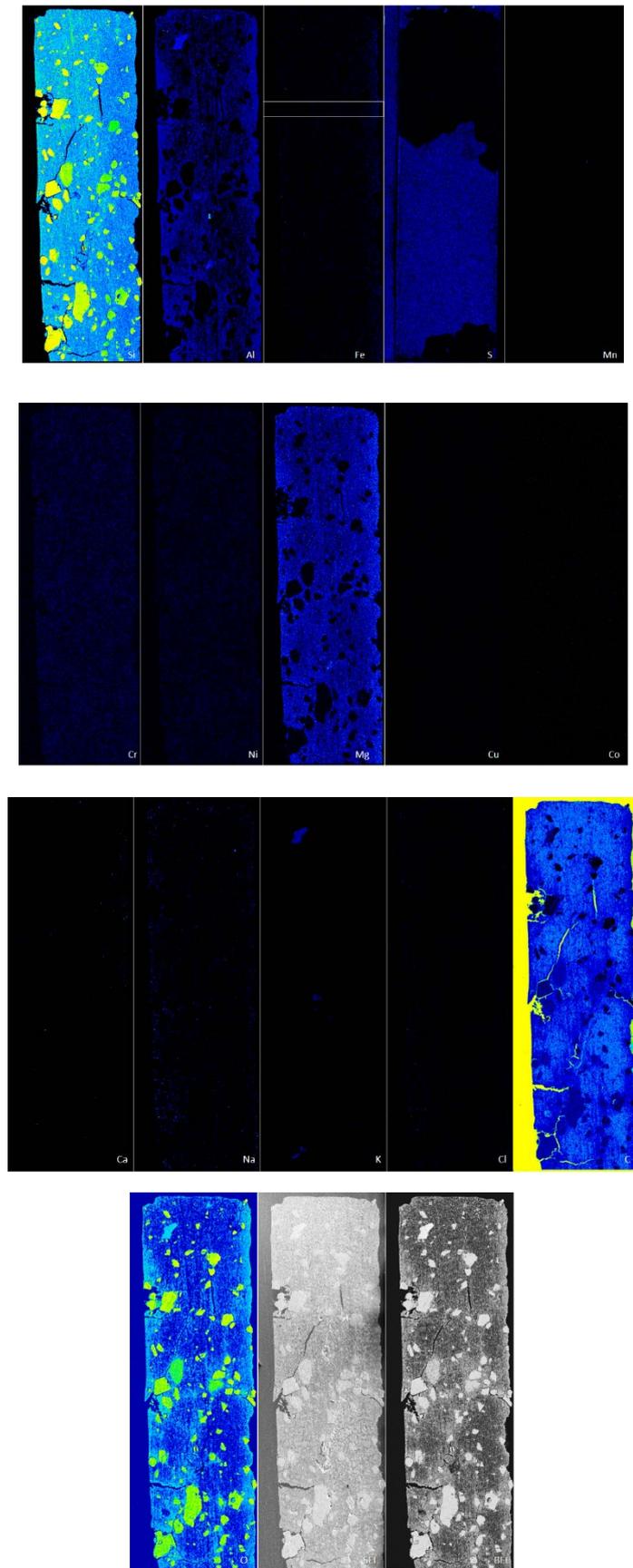


図 3.2.3-29 炭素鋼接触ベントナイトの EPMA マッピング結果 (ASW10_MB4)

(b) AFW10_TB6

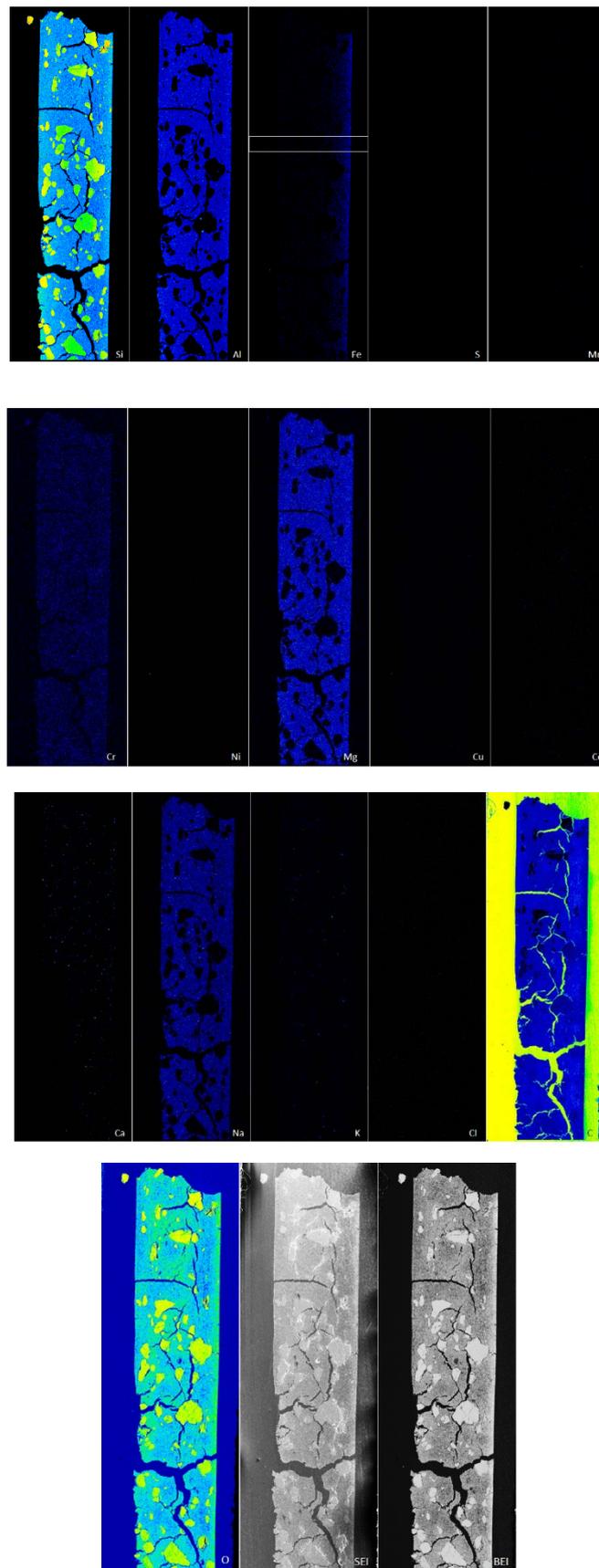


図 3.2.3-30 炭素鋼接触ベントナイトの EPMA マッピング結果 (AFW10_TB6)

これらのうち Fe マップは炭素鋼の溶解によって Fe がベントナイト側にどのように移行し変質に寄与したかを判定するために有効である。図 3.2.3-31 は測定領域 (Fe マップ上の白枠部) の Fe 強度プロファイルと比較して示したものである。強度が最大の接触部からそれが内部の強度に落ち着くまでの距離を読み取ると、ASW10_MB4 では 1.18 mm であり、AFW10_TB6 では 2.14 mm と、淡水系の方が 2 倍の Fe 変質深度を示していた。

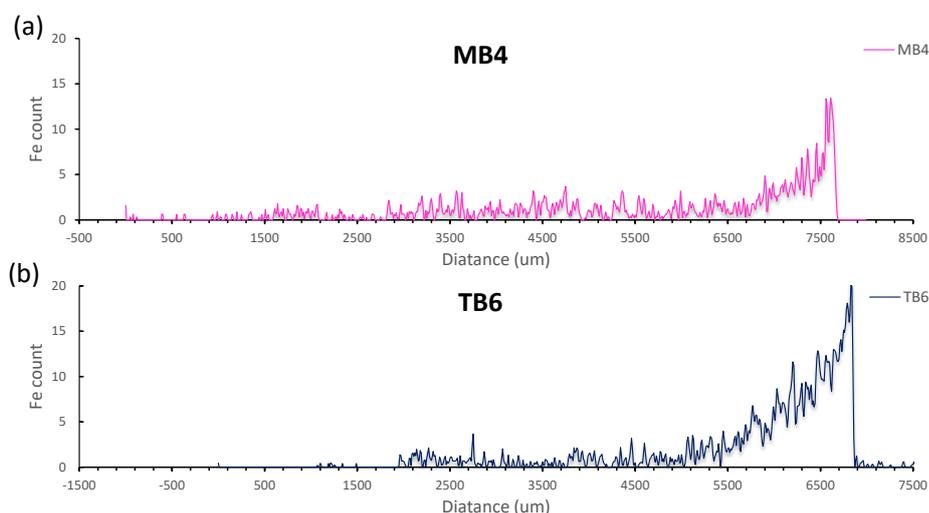


図 3.2.3-31 炭素鋼接触ベントナイトの Fe 強度プロファイルの比較(a: ASW10_MB4; b: AFW10_TB6)

マッピング領域において、界面から内部へのスメクタイトのスポット定量分析を行った。得られた化学組成をスメクタイトの構造式として計算(O = 22)した。その Fe 含有量(atom per formula unit: apfu)のプロファイルを図 3.2.3-32 に示す。海水系の MB4 試料では界面のデータが乏しいが、淡水系の TB6 試料は明確に界面で Fe 変質が 0.5 mm 程度の領域で確認できる。しかし、モンモリロナイト中の Fe の 0.15 apfu 程度の含有量はノントロナイト成分としてはわずかなものであり、この試験での Fe 変質は界面のみに限定され、内部への変質はモンモリロナイト-ノントロナイト系にとどまっていることがわかる。

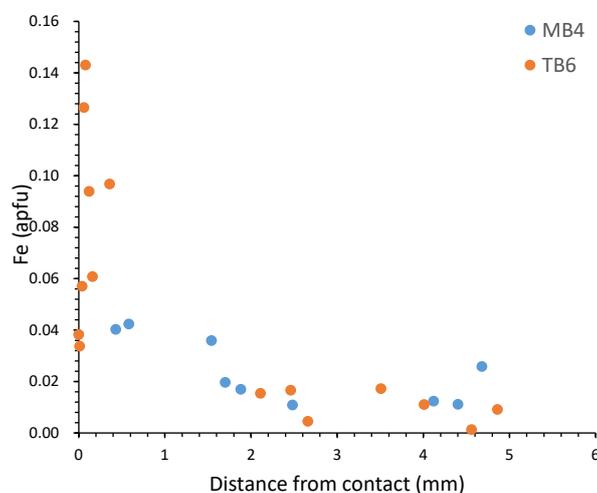


図 3.2.3-32 長期浸漬試験試料のベントナイトのスメクタイト Fe プロファイル

6) XRF 分析によるベントナイト試料の定量分析

ベントナイト試料の蛍光 X 線分光分析装置 (XRF) による全岩化学組成を、地質標準試料を用いた検量線法により分析し、ベントナイト試料全体の化学変質情報を取得した。表 3.2.3-8 に、昨年分析した試料のベントナイト全岩分析の結果と合わせて示す。海水系も淡水系も炭素鋼接触部のベントナイトは非接触部よりも Fe_2O_3 含有量は高いが、淡水系の方が接触部でより高い結果となった。またその濃度差は淡水系の方が大きいことがわかる。このことから、淡水系の方が炭素鋼からの Fe の放出フラックスが大きい、粘土の変質に消費されていることがわかる。さらに、溶接ゾーンを含む昨年の M5014(AFW10)試料では最大の Fe 含有量を示し、Fe の溶出挙動には溶接による促進効果があると思われる。また淡水系の方がバッチ溶液への Si, Al の放出量がかなり大きいことがバッチ溶液の分析からわかっているが、このことはベントナイトの化学組成にも反映されており、全岩化学組成は海水系と淡水系での変質挙動の特徴を表す良い指標であると思われる。

表 3.2.3-8 炭素鋼接触、非接触ベントナイトの全岩化学組成

Solution system	AFW			ASW		AFW	
Sample ID	M5104-C	M5104-B	M5104-A	MB4-A	MB4-B	TB6-A	TB6-B
Position	on weld metal	on steel	off steel	on steel	off steel	on steel	off steel
SiO ₂	79.72	80.03	78.40	77.07	77.16	78.74	80.64
TiO ₂	0.23	0.22	0.30	0.24	0.27	0.22	0.25
Al ₂ O ₃	8.69	7.87	12.40	11.66	12.65	10.83	11.63
Fe ₂ O ₃	7.58	7.01	2.88	4.94	3.44	5.52	2.38
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.07	0.09	0.06	0.06	0.05	0.09	0.06
MgO	1.13	0.88	1.50	2.17	1.92	1.21	1.26
CaO	1.01	2.00	2.54	1.02	1.38	1.61	2.11
Na ₂ O	0.49	0.40	0.83	0.80	0.95	0.66	0.65
K ₂ O	0.28	0.73	0.44	0.48	0.47	0.43	0.34
P ₂ O ₅	0.42	0.38	0.15	0.21	0.17	0.27	0.21
SO ₃	0.38	0.39	0.50	0.94	0.76	0.42	0.46
Cl	0.00	0.00	0.00	0.41	0.78	0.00	0.00
-O	0.00	0.00	0.00	0.09	0.18	0.00	0.00
total	100.00	100.00	100.00	99.91	99.82	100.00	100.00

7) FESEM-EDS 観察

a 炭素鋼

初期状態の炭素鋼は入手できなかったため、水素分析のために表面の腐食界面を完全なスクレイプで除去した試料を使って、その主要元素の EDS 分析を行った。図 3.2.3-33 と図

3.2.3-34 に海水系、淡水系それぞれの試験で用いた炭素鋼の分析結果を示す。

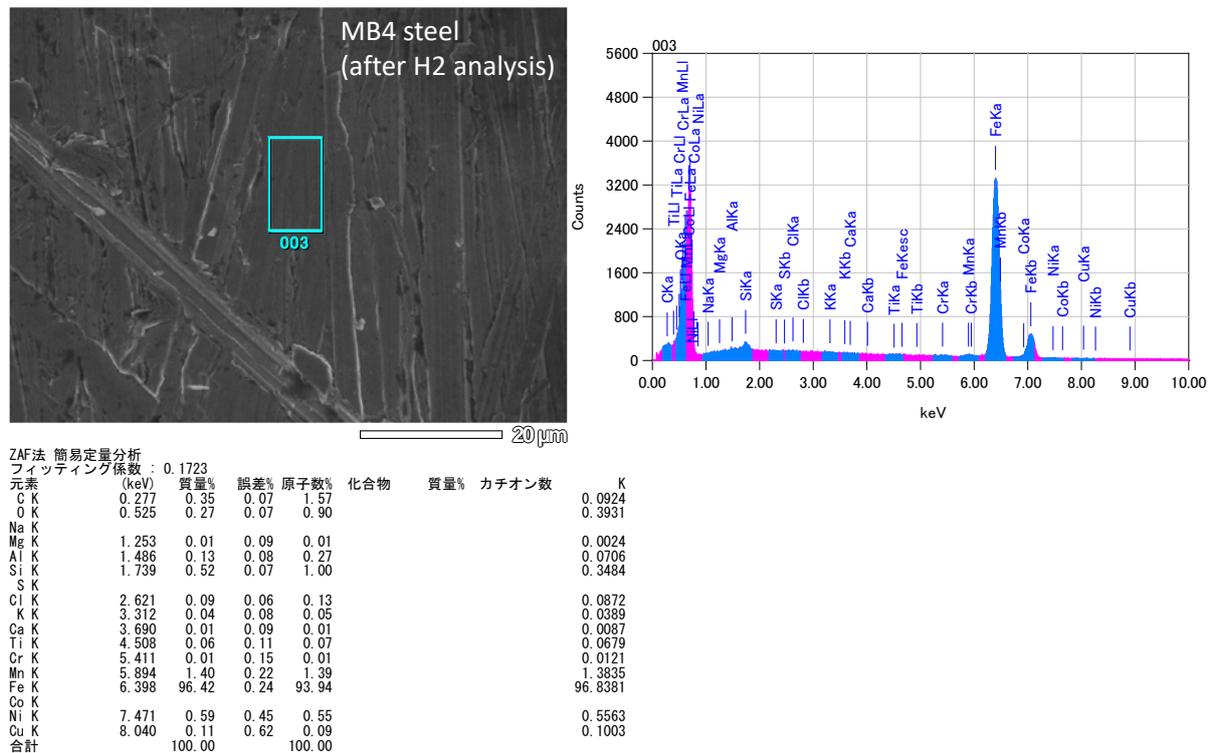


図 3.2.3-33 海水系試験で用いた炭素鋼(MB4)の FESEM-EDS 分析

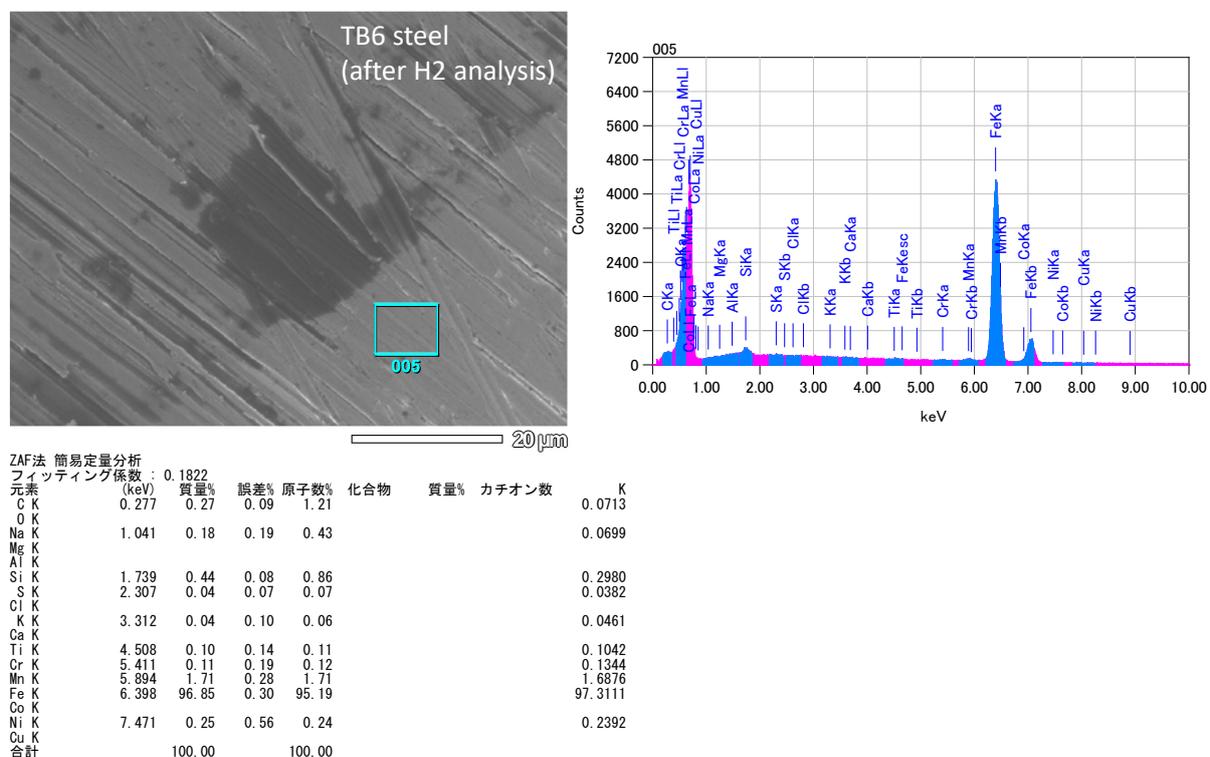


図 3.2.3-34 淡水系試験でも用いた炭素鋼(TB6)の FESEM-EDS 分析

2つの炭素鋼において、Mn, Cr, Si, Cの主要成分の顕著な違いは認められなかった。次にそれぞれの炭素鋼における腐食界面から上部被覆粘土層への鉱物変遷がわかる観察を行って、それぞれの変質反応の違いについて微視的な調査を行った。

b 海水系試験試料(MB4)の変質界面

海水系試験試料のMB4について、FESEM-EDS分析を行った。観察は試料への白金コートなどは一切行わず、そのまま実施した。以下のその結果を列記する。

炭素鋼腐食界面直上の粘土層ではノントロナイト成分に富むモンモリロナイトが分布し、それらは数ミクロン大のアルバイト質斜長石粒子を伴っている(図 3.2.3-35)。

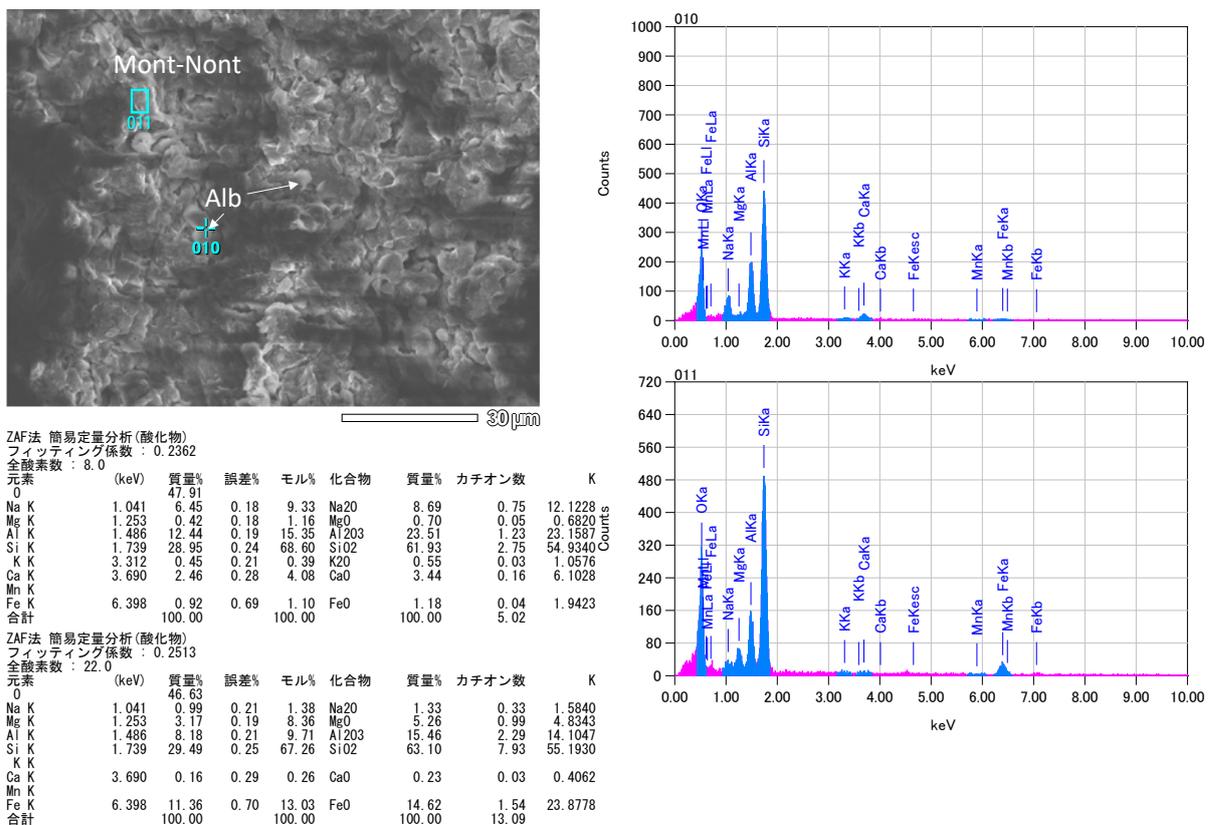
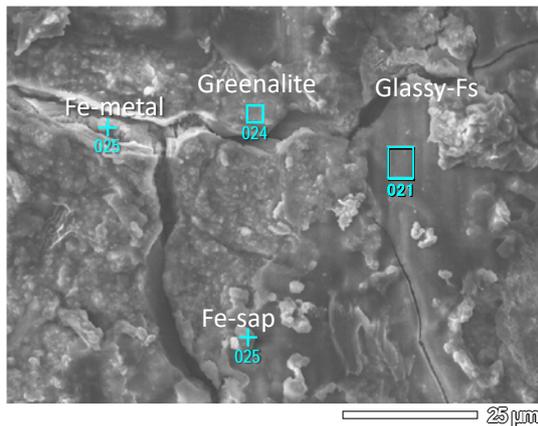


図 3.2.3-35 上位の粘土層のFESEM-EDS分析

この下位の炭素鋼近傍では、亀裂開口部において炭素鋼の金属鉄のシグナルが強く現れている場所と、その上位にあるFeSiO3組成のガラス質および鉄蛇紋石であるグリーナライト層の露出部が確認できる(図 3.2.3-36、図 3.2.3-37)。そして、さらにその上には分散粒子として鉄サポナイト質スメクタイトが点在している様子がわかる(図 3.2.3-36)。FeSiO3組成のガラス質部は非常にスムーズな表面をもっており、それより上位の粘土鉱物層とは全く産状が異なる。昨年度報告書ではこの固相をFeSiO3結晶であるフェロシライトとして記載したが、NaとS, Clが含まれており、輝石と同定するのは問題があると考えられ、非晶質なガラス相として今年度は捉えている。しかし、昨年の報告書ではFe2SiO4組成の固相も記載が

あり、おそらく均質なガラス相が生成しているとはとらえにくく、ファイヤライト結晶が生成している可能性が高い。図 3.2.3-38 にはファイヤライトと思われる結晶相とその上位にあるガラス質相、鉄蛇紋石の産状を示す。また、炭素鋼直上には常に水酸化鉄(Fe(OH)₂)が確認できるが、その近傍では、グリーンライトだけでなく、Al-rich の組成を持つシャモサイト(鉄緑泥石；図 3.2.3-39)や鉄サポナイト(図 3.2.3-41)、シリカ(図 3.2.3-40)などが共存している。



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.3252
 全酸素数: 14.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		35.67						
Na K	1.041	2.51	0.29	3.57	Na2O	3.38	0.68	2.3043
Mg K	1.253	1.14	0.25	3.07	MgO	1.89	0.29	1.0421
Al K	1.486	0.62	0.25	0.75	Al2O3	1.17	0.14	0.6981
Si K	1.739	19.10	0.26	44.56	SiO2	40.87	4.27	26.4675
K K								
Ca K								
Mn K	5.894	0.41	0.62	0.48	MnO	0.52	0.05	0.6773
Fe K	6.398	40.55	0.67	47.57	FeO	52.17	4.56	68.8107
合計		100.00		100.00		100.00	10.00	

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.3175
 全酸素数: 14.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		27.31						
Na K	1.041	0.87	0.30	1.28	Na2O	1.18	0.31	0.5664
Mg K	1.253	0.72	0.25	2.00	MgO	1.20	0.24	0.4864
Al K	1.486	0.05	0.24	0.06	Al2O3	0.10	0.02	0.0439
Si K	1.739	6.50	0.25	15.61	SiO2	13.91	1.90	6.9784
S K	2.307	1.01	0.25	2.12	SO3	2.51	0.26	1.4211
Cl K	2.621	2.55	0.11	4.85	Cl	2.55	0.00	3.7878
K K								
Ca K	3.690	0.77	0.24	1.30	CaO	1.08	0.16	1.3015
Mn K	5.894	1.51	0.55	1.86	MnO	1.96	0.23	2.1418
Fe K	6.398	58.70	0.59	70.91	FeO	75.52	8.62	83.3029
合計		100.00		100.00		100.00	11.73	

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.3275
 全酸素数: 14.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		0.525	2.28	0.08				3.1185
Na K	1.041	0.07	0.17	0.16				0.0297
Mg K	1.253	0.26	0.11	0.54				0.1080
Al K	1.486	0.27	0.09	0.51				0.1453
Si K	1.739	1.18	0.08	2.13				0.8098
S K	2.307	0.76	0.07	1.20				0.7278
Cl K	2.621	3.89	0.07	5.56				3.9665
K K								
Ca K								
Mn K	5.894	1.73	0.28	1.59				1.6964
Fe K	6.398	86.38	0.30	78.38				86.3874
Co K	6.924	0.85	0.41	0.73				0.8259
Ni K	7.471	1.92	0.55	1.66				1.8046
Cu K	8.040	0.42	0.76	0.33				0.3802
合計		100.00		100.00				

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.2551
 全酸素数: 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		40.85						
Na K	1.041	1.27	0.22	1.79	Na2O	1.72	0.48	1.4322
Mg K	1.253	0.60	0.18	1.59	MgO	0.99	0.21	0.6612
Al K	1.486	2.00	0.18	2.40	Al2O3	3.78	0.64	2.6902
Si K	1.739	24.86	0.20	57.33	SiO2	53.18	7.63	39.6056
S K	2.307	1.15	0.24	2.33	SO3	2.88	0.31	2.0311
Cl K	2.621	0.78	0.11	1.42	Cl	0.78	0.00	1.4554
K K	3.312	0.21	0.17	0.18	K2O	0.26	0.05	0.4309
Ca K	3.690	0.45	0.23	0.74	CaO	0.64	0.10	0.9763
Mn K	5.894	1.12	0.51	1.32	MnO	1.44	0.18	2.0075
Fe K	6.398	26.04	0.55	30.20	FeO	33.50	4.02	47.5515
Co K	6.924	0.13	0.74	0.14	CoO	0.16	0.02	0.2285
Ni K	7.471	0.15	0.97	0.16	NiO	0.19	0.02	0.2613
Cu K	8.040	0.39	1.33	0.40	CuO	0.49	0.05	0.6683
合計		100.00		100.00		100.00	13.70	

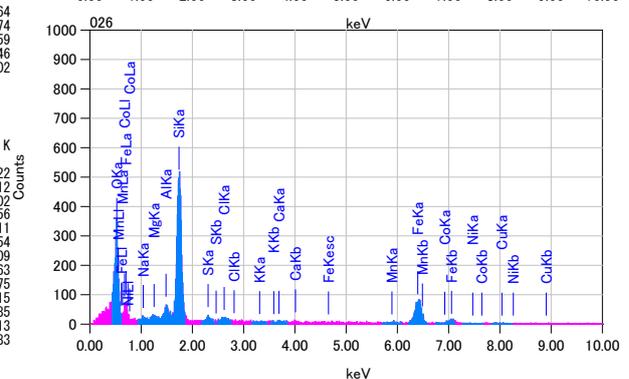
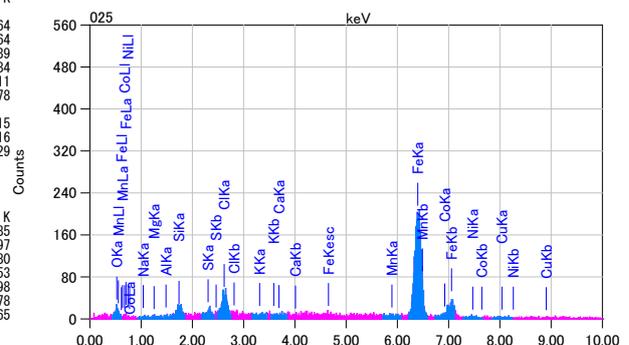
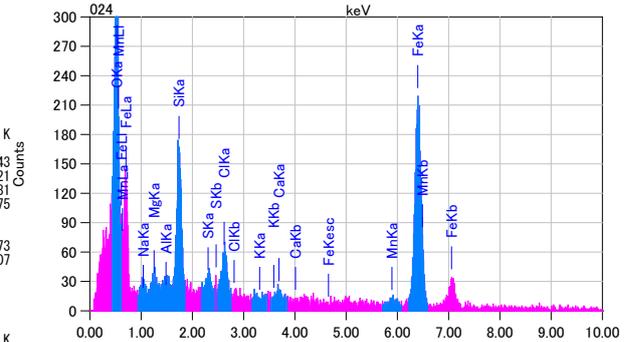
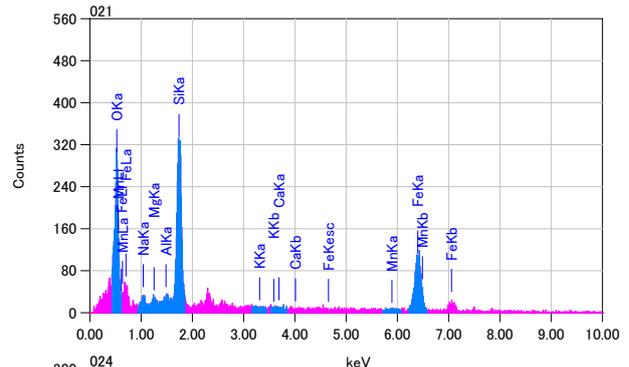
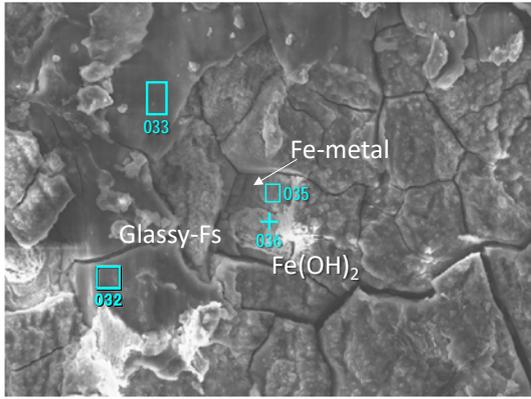


図 3.2.3-36 炭素鋼から上位の変質層の FESEM-EDS 分析



ZAF法 簡易定量分析 (酸化物)
 フィッティング係数 : 0.2947
 全酸素数 : 24.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		37.00						
Na K	1.041	0.82	0.25	1.15	Na2O	1.10	0.37	0.7738
Mg K	1.253	1.58	0.21	4.21	MgO	2.61	0.67	1.5085
Al K	1.486	0.74	0.21	0.89	Al2O3	1.40	0.28	0.8622
Si K	1.739	19.01	0.22	43.96	SiO2	40.67	7.02	27.0550
S K	2.307	1.64	0.25	3.31	SO3	4.08	0.53	2.7254
Cl K	2.621	1.18	0.11	2.16	Cl	1.18	0.00	2.0709
K K								
Ca K	3.690	0.11	0.24	0.18	CaO	0.16	0.03	0.2262
Mn K	5.894	0.77	0.54	0.91	MnO	1.00	0.15	1.2991
Fe K	6.398	37.16	0.59	43.22	FeO	47.81	6.91	63.4789
合計		100.00		100.00		100.00		15.96

ZAF法 簡易定量分析 (酸化物)
 フィッティング係数 : 0.2753
 全酸素数 : 24.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		37.03						
Na K	1.041	2.25	0.21	3.22	Na2O	3.04	1.02	2.1616
Mg K	1.253	0.98	0.19	2.64	MgO	1.62	0.42	0.9308
Al K	1.486	0.75	0.18	0.92	Al2O3	1.42	0.29	0.8822
Si K	1.739	19.00	0.20	44.51	SiO2	40.65	7.01	27.1905
S K	2.307	1.64	0.22	3.37	SO3	4.10	0.53	2.7542
Cl K	2.621	0.43	0.10	0.80	Cl	0.43	0.00	0.7581
K K								
Ca K	3.312	0.35	0.16	0.29	K2O	0.42	0.09	0.6631
Mn K	5.894	0.21	0.47	0.25	MnO	0.27	0.04	0.3537
Fe K	6.398	37.36	0.51	44.00	FeO	48.06	6.93	64.3058
合計		100.00		100.00		100.00		16.33

ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数 : 0.3084

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
C K	0.277	0.91	0.13	3.48				0.2047
O K	0.525	4.49	0.09	12.91				6.1715
Na K	1.041	0.15	0.20	0.29				0.0602
Mg K								
Al K	1.486	0.02	0.10	0.03				0.0099
Si K	1.739	4.35	0.09	7.14				3.0733
S K	2.307	2.64	0.08	3.80				2.5498
Cl K	2.621	0.69	0.09	0.89				0.6982
K K								
Ca K	3.690	0.04	0.13	0.04				0.0419
Cr K	5.411	0.17	0.22	0.15				0.1971
Mn K	5.894	1.11	0.32	0.93				1.0913
Fe K	6.398	83.75	0.34	69.02				84.3043
Co K								
Ni K	7.471	1.55	0.63	1.21				1.4677
Cu K	8.040	0.14	0.86	0.10				0.1302
合計		100.00		100.00				

ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数 : 0.3077

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O K	0.525	33.99	0.12	62.80				44.4640
Na K								
Mg K								
Al K								
Si K	1.486	0.10	0.15	0.11				0.0521
S K	1.739	1.80	0.14	1.89				1.1403
S K	2.307	0.63	0.11	0.58				0.5436
Cl K	2.621	3.22	0.13	2.68				2.9038
K K	3.312	0.15	0.18	0.11				0.1385
Ca K	3.690	0.08	0.20	0.06				0.0806
Cr K	5.411	0.18	0.36	0.10				0.1749
Mn K	5.894	1.53	0.50	0.82				1.2687
Fe K	6.398	57.76	0.54	30.57				48.7940
Co K								
Ni K								
Cu K	8.040	0.57	1.37	0.26				0.4397
合計		100.00		100.00				

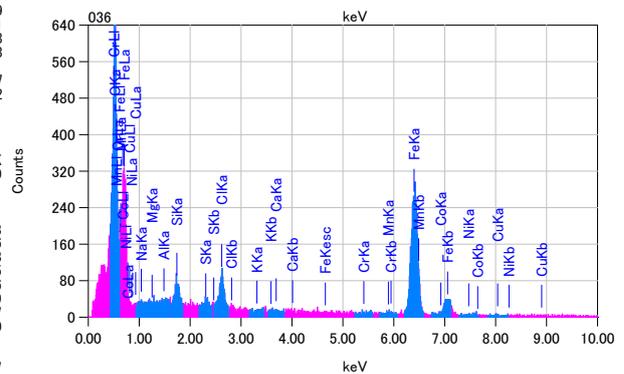
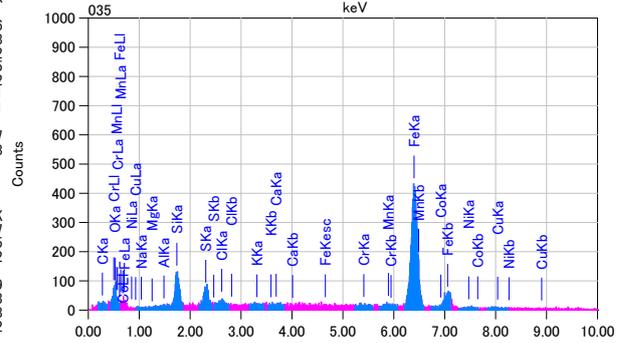
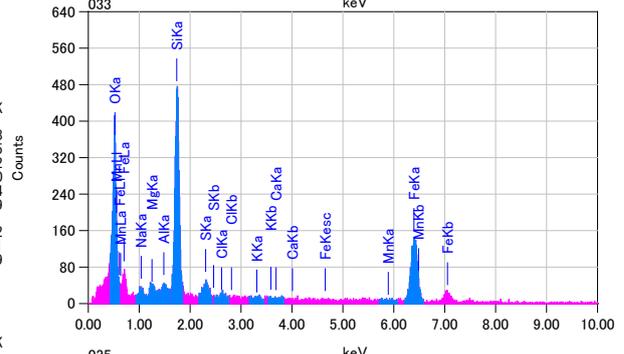
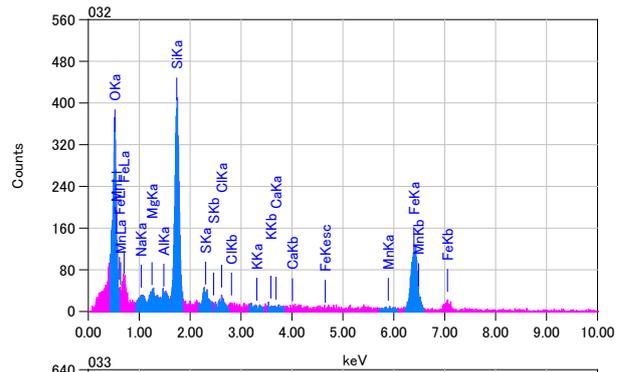
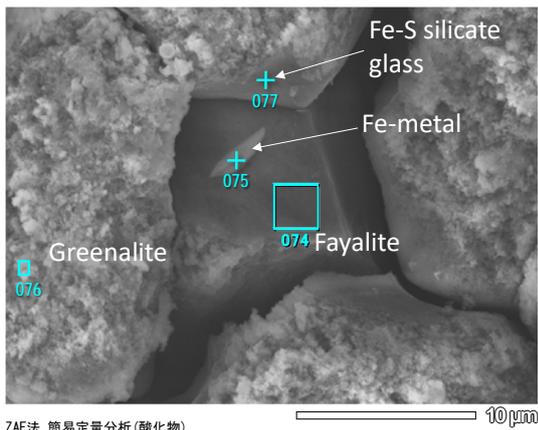


図 3.2.3-37 炭素鋼から上位の変質層の FESEM-EDS 分析 (その 2)



ZAF法 簡易定量分析 (酸化物)
 フィッティング係数 : 0.2496
 全酸素数 : 4.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		31.45						
Na								
Mg	1.253	0.35	0.11	0.98	MgO	0.58	0.03	0.2627
Al	1.486	0.20	0.11	0.26	Al2O3	0.39	0.02	0.1937
Si	1.739	11.68	0.11	28.42	SiO2	24.99	0.85	13.8414
S	2.307	1.38	0.12	2.94	SO3	3.45	0.09	2.0607
Cl	2.621	0.41	0.05	0.78	Cl	0.41	0.00	0.6376
K	3.12	0.14	0.08	0.12	K2O	0.16	0.01	0.2307
Ca	3.690	0.36	0.11	0.62	CaO	0.51	0.02	0.6559
Cr	5.411	0.22	0.21	0.14	Cr2O3	0.32	0.01	0.3715
Mn	5.894	1.54	0.26	1.91	MnO	1.99	0.06	2.3040
Fe	6.398	50.58	0.28	61.89	FeO	65.07	1.84	76.9939
Co	6.924	0.20	0.37	0.23	CoO	0.25	0.01	0.2905
Ni	7.471	0.94	0.50	1.10	NiO	1.20	0.03	1.3821
Cu	8.040	0.55	0.68	0.59	CuO	0.69	0.02	0.7753
合計		100.00		100.00		100.00		2.97

ZAF法 簡易定量分析 (酸化物)
 フィッティング係数 : 0.3307

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	2.17	0.09	6.96				3.1934
Na	1.041	0.23	0.20	0.50		2.35	0.46	0.0896
Mg	1.253	0.25	0.13	0.52		2.24	0.34	0.1036
Al	1.486	0.07	0.13	0.13		1.00	0.12	0.0371
Si	1.739	2.54	0.10	4.64		1.7426		0.3041
S	2.307	0.32	0.08	0.51		0.3041		
Cl	2.621	0.14	0.09	0.20		0.1411		
K								0.0778
Ca	3.690	0.07	0.13	0.08		0.0778		
Cr	5.894	3.93	0.33	3.66		3.8597		3.8597
Mn	6.398	90.29	0.36	82.79		90.4510		90.4510
Co								
Fe								
Ni								
Cu								
合計		100.00		100.00				

ZAF法 簡易定量分析 (酸化物)
 フィッティング係数 : 0.2477
 全酸素数 : 14.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		36.61						
Na	1.041	1.74	0.31	2.46	Na2O	2.35	0.46	1.6461
Mg	1.253	1.25	0.26	3.61	MgO	2.24	0.34	1.2786
Al	1.486	0.53	0.26	0.63	Al2O3	1.00	0.12	0.6106
Si	1.739	20.46	0.28	47.30	SiO2	43.77	4.46	29.0262
K								
Ca	3.690	0.58	0.30	0.94	CaO	0.81	0.09	1.1740
Mn	5.894	1.23	0.67	1.45	MnO	1.59	0.14	2.0663
Fe	6.398	37.51	0.73	43.61	FeO	48.25	4.11	64.1981
合計		100.00		100.00		100.00		9.71

ZAF法 簡易定量分析 (酸化物)
 フィッティング係数 : 0.2499
 全酸素数 : 24.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		28.94						
Na	1.041	0.51	0.14	0.77	Na2O	0.69	0.30	0.3373
Mg	1.253	0.24	0.11	0.67	MgO	0.39	0.13	0.1616
Al								
Si	1.739	8.32	0.10	20.47	SiO2	17.79	3.94	9.1447
S	2.307	1.12	0.11	2.41	SO3	2.79	0.46	1.5960
Cl	2.621	0.39	0.05	0.75	Cl	0.39	0.00	0.5818
K	3.12	0.09	0.08	0.08	K2O	0.11	0.03	0.1521
Ca	3.690	0.33	0.10	0.58	CaO	0.47	0.11	0.5769
Cr	5.411	0.05	0.19	0.04	Cr2O3	0.08	0.01	0.0891
Mn	5.894	1.43	0.23	1.80	MnO	1.85	0.35	2.0515
Fe	6.398	56.49	0.25	69.91	FeO	72.68	13.47	82.3006
Co								
Ni	7.471	1.63	0.44	1.92	NiO	2.08	0.37	2.2765
Cu	8.040	0.55	0.61	0.60	CuO	0.69	0.11	0.7319
合計		100.00		100.00		100.00		19.29

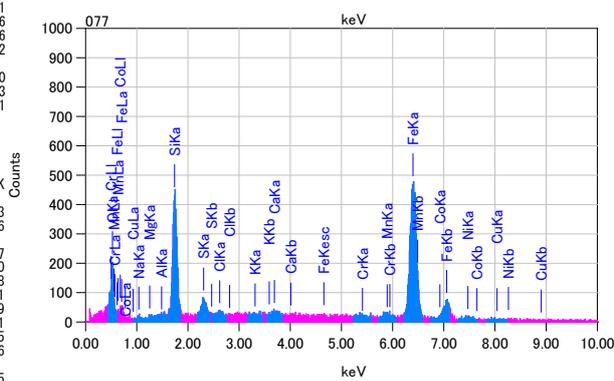
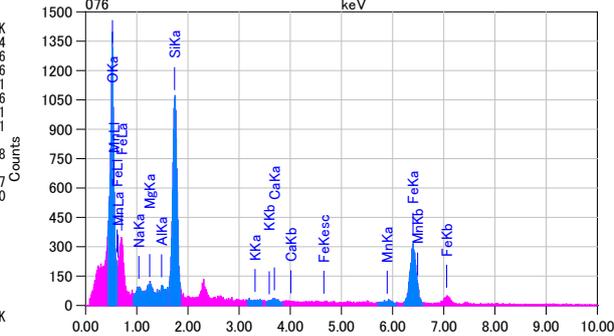
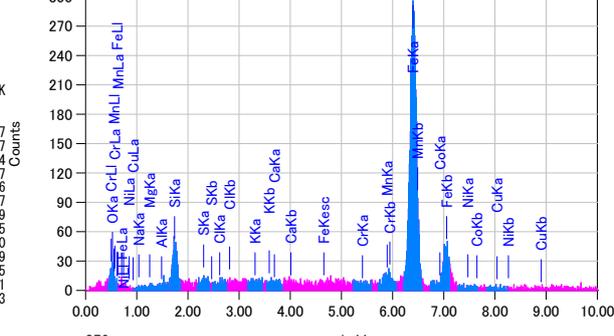
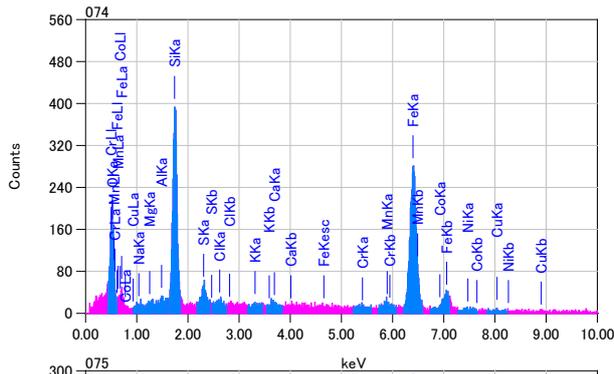
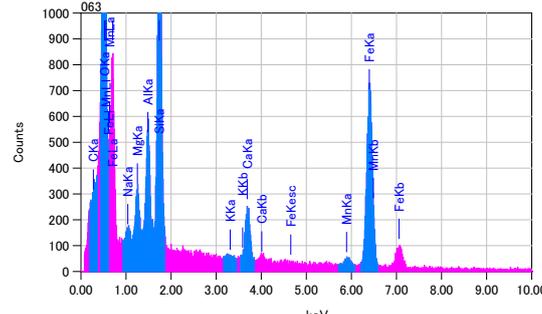
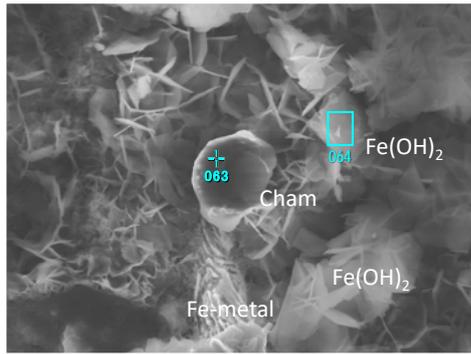


図 3.2.3-38 鉄オリビン組成の変質相から鉄蛇紋石までの産状



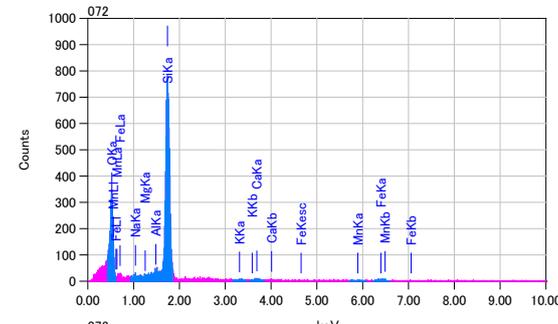
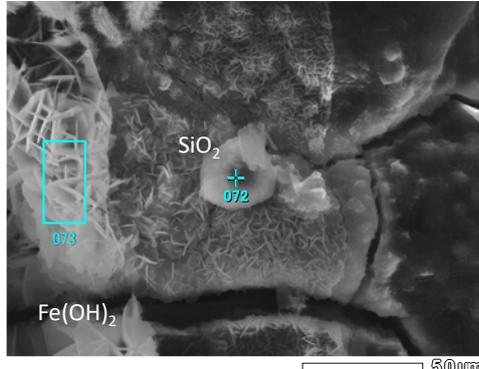
ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.1956
 全酸素数: 14.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		33.90						
Na	1.041	0.92	0.23	1.33	Na2O	1.24	0.26	0.8034
Mg	1.253	2.31	0.20	6.35	MgO	3.83	0.63	2.0530
Al	1.486	4.42	0.20	5.48	Al2O3	8.35	1.08	4.7766
Si	1.739	12.90	0.21	30.69	SiO2	27.59	3.03	16.6157
K	3.312	0.03	0.16	0.02	K2O	0.03	0.00	0.0507
Ca	3.690	3.41	0.22	5.68	CaO	4.77	0.56	6.6589
Mn	5.894	1.60	0.49	1.94	MnO	2.06	0.19	2.5771
Fe	6.398	40.52	0.53	48.49	FeO	52.12	4.79	66.4656
合計		100.00		100.00		100.00	10.56	

ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数: 0.2220

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	23.93	0.08	50.06				32.4767
Na	1.041	0.63	0.17	0.92				0.2475
Mg	1.253	0.33	0.11	0.46				0.1366
Al	1.486	0.31	0.10	0.38				0.1605
Si	1.739	4.20	0.09	5.01				2.7926
S	2.307	0.57	0.07	0.60				0.5123
Cl	2.621	1.49	0.08	1.41				1.4145
K	3.312	0.13	0.11	0.11				0.1347
Ca	3.690	0.27	0.12	0.22				0.2867
Mn	5.894	0.62	0.30	0.38				0.5525
Fe	6.398	67.51	0.33	40.46				61.2853
合計		100.00		100.00				

図 3.2.3-39 水酸化鉄近傍の鉄緑泥石の FESEM-EDS 分析 (その 2)



ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数: 0.2063

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	49.92	0.16	64.17				53.2443
Na	1.041	0.82	0.14	0.73				0.6303
Mg	1.253	0.04	0.11	0.03				0.0255
Al	1.486	0.73	0.10	0.56				0.6092
Si	1.739	45.27	0.10	33.15				42.4457
K	3.312	0.34	0.18	0.18				0.3314
Ca	3.690	0.83	0.20	0.42				0.8659
Fe	6.398	2.06	0.54	0.76				1.8476
合計		100.00		100.00				

ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数: 0.2663

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	24.81	0.10	51.29				32.1715
Na	1.041	0.99	0.20	1.43				0.3939
Al								
Si	1.739	2.48	0.10	2.92				1.6708
S	2.307	0.89	0.08	0.92				0.8154
Cl	2.621	3.88	0.09	3.62				1.7310
K	3.312	0.10	0.13	0.09				0.1052
Ca	3.690	0.77	0.15	0.64				0.8324
Cr								
Mn	5.894	0.70	0.36	0.42				0.6292
Fe	6.398	64.43	0.39	38.15				58.6305
Co								
Ni	7.471	0.94	0.71	0.53				0.8202
Cu								
合計		100.00		100.00				

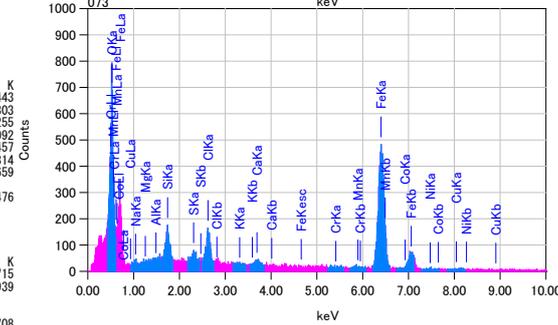
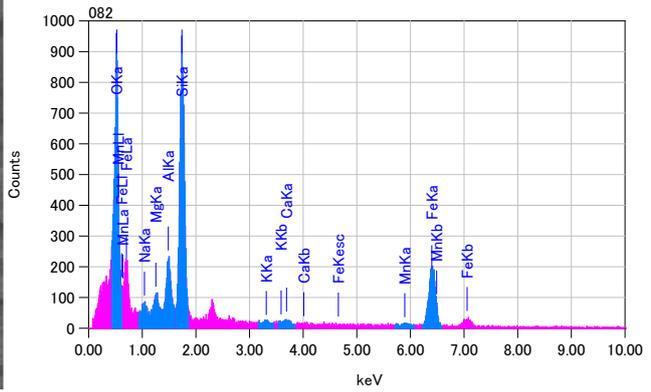
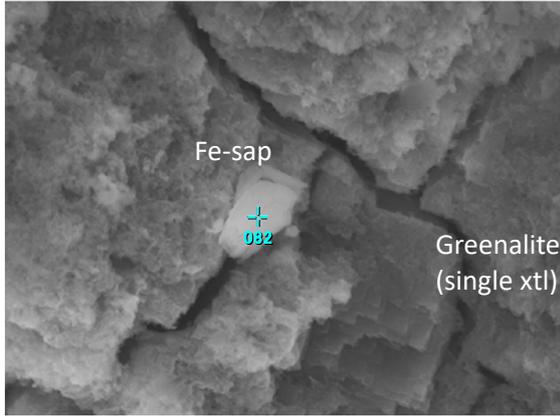
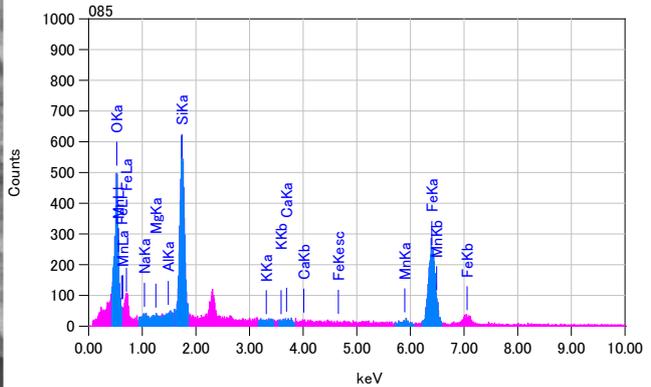


図 3.2.3-40 水酸化鉄と共存するシリカ



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数 : 0.2423
 全酸素数 : 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		38.96						
Na K	1.041	1.72	0.25	2.46	Na2O	2.32	0.68	1.8866
Mg K	1.253	1.97	0.22	5.31	MgO	3.26	0.73	2.1265
Al K	1.486	4.47	0.22	5.44	Al2O3	8.44	1.50	5.7935
Si K	1.739	21.00	0.24	49.14	SiO2	44.93	6.76	31.8385
K K	3.312	0.37	0.20	0.31	K2O	0.45	0.09	0.7546
Ca K	3.690	0.51	0.26	0.94	CaO	0.72	0.12	1.1039
Mn K	5.894	1.17	0.60	1.40	MnO	1.51	0.19	2.0931
Fe K	6.398	29.82	0.64	35.09	FeO	38.37	4.82	54.4033
合計		100.00		100.00		100.00	14.88	

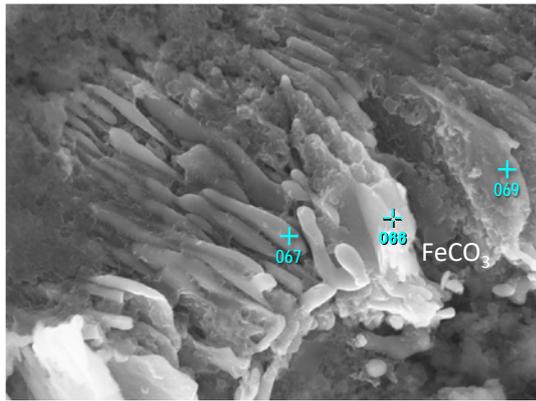


ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数 : 0.2803
 全酸素数 : 4.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		33.49						
Na K	1.041	1.01	0.26	1.47	Na2O	1.36	0.08	0.8148
Mg K	1.253	0.34	0.22	0.94	MgO	0.57	0.03	0.2824
Al K	1.486	0.15	0.22	0.19	Al2O3	0.29	0.01	0.1577
Si K	1.739	16.59	0.23	39.45	SiO2	35.49	1.13	21.2607
K K								
Ca K	3.690	0.05	0.23	0.08	CaO	0.07	0.00	0.0955
Mn K	5.894	1.37	0.53	1.67	MnO	1.77	0.05	2.1614
Fe K	6.398	46.99	0.57	56.19	FeO	60.45	1.61	75.2274
合計		100.00		100.00		100.00	2.91	

図 3.2.3-41 結晶性の良い鉄蛇紋石から鉄サポナイトの産状

ケイ酸塩である粘土鉱物と合わせて、炭酸塩と思われる不定形の二次鉱物も頻りに確認できる。これらは、おそらく初期は炭素鋼中の FeC などの離溶組織であったと思われるが、分析すると酸素、ケイ素、硫酸、Ca を含んでおり、組成としてはシデライト組成に近くなる。



ZAF法 簡易定量分析
フィッティング係数: 0.2260

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
C	0.277	9.28	0.09	22.14				2.4236
O	0.525	20.29	0.10	36.36				24.7645
Na	1.041	0.78	0.14	0.97				0.3864
Mg	1.253	0.78	0.09	0.92				0.3895
Al	1.486	0.10	0.07	0.11				0.0673
Si	1.739	6.15	0.07	6.28				4.9936
S	2.307	1.03	0.06	0.92				1.0956
Cl	2.621	0.54	0.07	0.43				0.6003
K								
Ca	3.690	2.84	0.10	2.03				3.6033
Cr	5.411	0.14	0.18	0.08				0.1634
Mn	5.894	2.13	0.25	1.11				2.2254
Fe	6.398	54.40	0.27	27.92				57.7414
Co								
Ni	7.471	0.83	0.49	0.40				0.8405
Cu	8.040	0.71	0.68	0.32				0.6964
合計		100.00		100.00				

ZAF法 簡易定量分析
フィッティング係数: 0.2273

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
C	0.277	8.72	0.08	22.52				2.4135
O	0.525	16.85	0.09	32.66				21.1424
Na	1.041	0.78	0.15	1.03				0.3469
Mg	1.253	0.55	0.09	0.70				0.2598
Al	1.486	0.13	0.08	0.15				0.0781
Si	1.739	2.58	0.07	2.85				1.9861
S	2.307	0.89	0.06	0.86				0.9269
Cl	2.621	0.33	0.06	0.29				0.3596
K								
Ca	3.690	2.46	0.10	1.90				3.0627
Cr	5.411	0.09	0.17	0.05				0.1049
Mn	5.894	2.21	0.25	1.25				2.2658
Fe	6.398	63.58	0.27	35.30				66.2004
Co								
Ni	7.471	0.86	0.49	0.45				0.8530
Cu								
合計		100.00		100.00				

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
フィッティング係数: 0.2400
全酸素数: 24.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
C	0.277	7.36	0.24	38.77	CO2	28.81	6.21	4.2305
O		40.49						
Na	1.041	0.44	0.14	0.57	Na2O	0.60	0.18	0.4125
Mg	1.253	0.61	0.11	1.50	MgO	1.02	0.24	0.5932
Al	1.486	0.14	0.11	0.16	Al2O3	0.27	0.05	0.1722
Si	1.739	4.37	0.11	9.21	SiO2	9.34	1.48	6.6142
S	2.307	0.60	0.12	1.12	SO3	1.51	0.18	1.1937
Cl	2.621	0.39	0.05	0.65	Cl	0.39	0.00	0.8006
K								
Ca	3.690	0.51	0.11	0.75	CaO	0.71	0.12	1.1707
Cr								
Mn	5.894	1.42	0.27	1.53	MnO	1.84	0.25	2.6648
Fe	6.398	42.71	0.29	45.30	FeO	54.95	7.25	81.3207
Co								
Ni	7.471	0.45	0.51	0.45	NiO	0.57	0.07	0.8270
Cu								
合計		100.00		100.00		100.00	16.03	

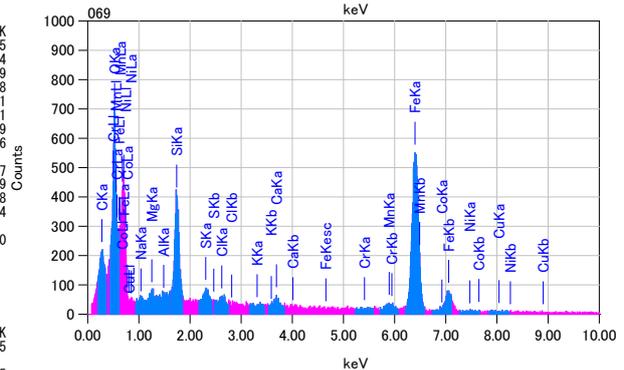
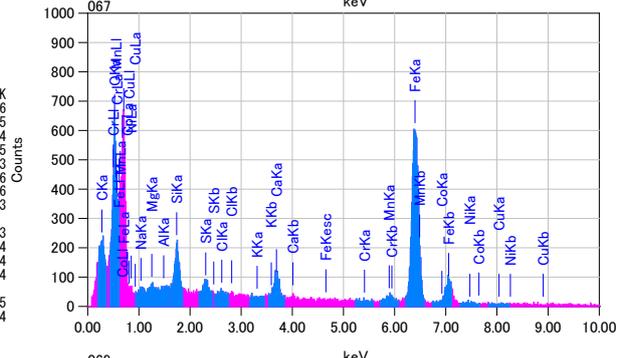
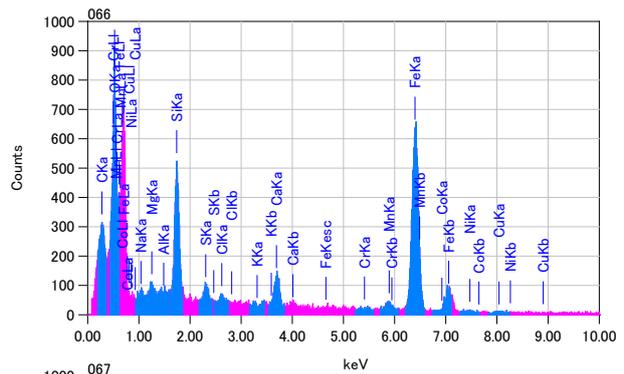
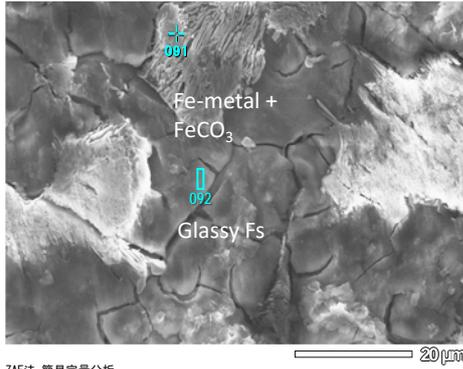


図 3.2.3-42 炭素鋼離溶組織部の変質相の FESEM-EDS 分析

c 淡水系試験試料(TB6)の変質界面

淡水系試験試料の観察結果を以下に列記する。炭素鋼にしばしば見られる離溶組織が変質したシデライト質沈殿相と共存するフェロシライト質の非晶質部(ガラス)は、海水系での試験試料と同様に観察できるが、Na, Clの含有量は非常に低く、主な成分はFe-Si-Sである(図 3.2.3-43、図 3.2.3-44)。



ZAF法 簡易定量分析
フィッティング係数: 0.2964

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.277	5.38	0.12	17.02				1.3444
Na	0.525	8.24	0.11	19.56				11.1501
Mg	1.253	0.15	0.12	0.24				0.069
Al	1.486	0.41	0.10	0.57				0.237
Si	1.739	5.66	0.09	7.65				4.1965
S	2.307	0.68	0.08	0.81				0.6807
Cl	2.621	0.02	0.09	0.02				0.0213
K	3.312	0.23	0.11	0.22				0.2570
Ca	3.690	0.22	0.13	0.21				0.2716
Cr	5.411	0.22	0.22	0.16				0.2598
Mn	5.894	3.36	0.32	2.32				3.4193
Fe	6.398	73.39	0.35	49.90				76.0720
Co	6.924	0.44	0.47	0.29				0.4461
Ni	7.471	1.57	0.63	1.02				1.5392
Cu	8.040	0.04	0.88	0.02				0.0355
合計		100.00		100.00				

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
フィッティング係数: 0.2580
全酸素数: 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		39.82						
Na	1.041	1.56	0.23	2.25	Na2O	2.10	0.60	1.6313
Mg	1.253	0.22	0.20	0.59	MgO	0.36	0.08	0.2251
Al	1.486	1.36	0.20	1.67	Al2O3	2.57	0.45	1.7350
Si	1.739	21.76	0.21	51.31	SiO2	46.56	6.85	33.3441
S	2.307	2.46	0.24	5.08	SO3	6.14	0.68	4.2818
Cl								
K	3.312	0.01	0.17	0.01	K2O	0.01	0.00	0.0224
Ca	3.690	0.39	0.23	0.64	CaO	0.54	0.09	0.8186
Cr	5.411	0.93	0.53	1.12	MnO	1.20	0.15	1.6363
Mn	5.894	0.93	0.57	37.33	FeO	40.51	4.98	56.3053
Fe	6.398	31.49		100.00		100.00	13.87	
合計		100.00		100.00				

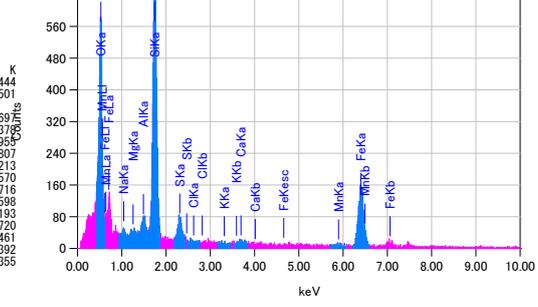
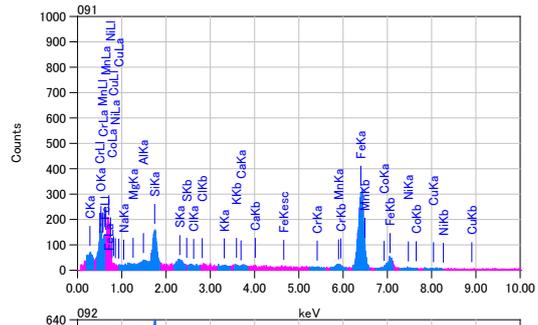
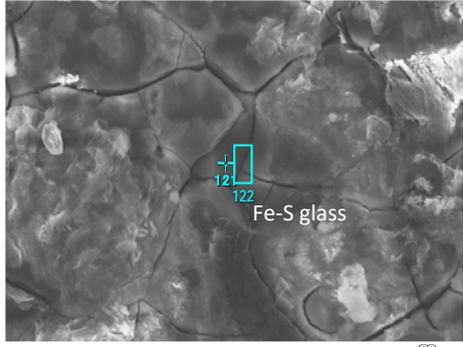


図 3.2.3-43 ガラス質フェロシライトと共存する金属鉄とシデライト質沈殿相



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
フィッティング係数: 0.2813
全酸素数: 24.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		25.94						
Na	1.041	0.35	0.14	0.54	Na2O	0.47	0.23	0.2063
Mg	1.253	0.02	0.11	0.07	MgO	0.04	0.01	0.0139
Al	1.486	0.08	0.11	0.10	Al2O3	0.14	0.04	0.0598
Si	1.739	5.10	0.11	12.00	SiO2	10.92	2.69	5.1396
S	2.307	0.28	0.11	0.62	SO3	0.70	0.13	0.3791
Cl								
K								
Ca	3.690	0.02	0.10	0.04	CaO	0.03	0.01	0.0383
Cr								
Mn	5.894	1.52	0.23	1.95	MnO	1.96	0.41	2.0668
Fe	6.398	63.69	0.25	80.37	FeO	81.94	16.89	88.1935
Co								
Ni	7.471	2.20	0.45	2.64	NiO	2.80	0.55	2.8948
Cu	8.040	0.80	0.61	0.88	CuO	1.00	0.19	1.0080
合計		100.00		100.00		100.00	21.14	

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
フィッティング係数: 0.2715
全酸素数: 24.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		29.70						
Na	1.041	0.52	0.18	0.79	Na2O	0.71	0.29	0.3546
Mg	1.253	0.01	0.14	0.03	MgO	0.01	0.00	0.0064
Al	1.486	0.17	0.13	0.21	Al2O3	0.31	0.08	0.1483
Si	1.739	9.50	0.14	23.43	SiO2	20.32	4.37	10.6875
S	2.307	1.10	0.14	2.37	SO3	2.74	0.44	1.5865
Cl	2.621	0.03	0.06	0.07	Cl	0.03	0.00	0.0513
K								
Ca	3.690	0.22	0.13	0.38	CaO	0.31	0.07	0.3856
Cr	5.411	0.04	0.25	0.03	Cr2O3	0.07	0.01	0.0746
Mn	5.894	0.85	0.31	1.07	MnO	1.09	0.20	1.2310
Fe	6.398	56.40	0.33	69.94	FeO	72.56	13.06	83.4245
Co								
Ni	7.471	1.14	0.59	1.34	NiO	1.45	0.25	1.6146
Cu	8.040	0.32	0.81	0.35	CuO	0.40	0.07	0.4352
合計		100.00		100.00		100.00	18.85	

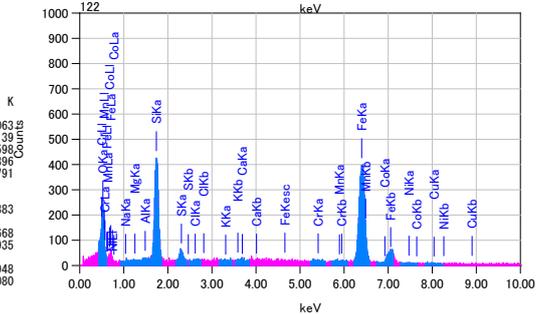
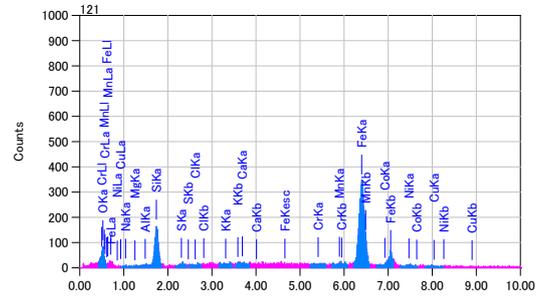
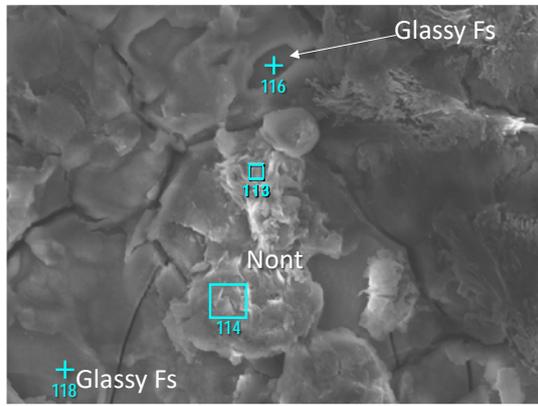


図 3.2.3-44 炭素鋼上の Fe-S ガラス質被膜

変質相の層状構造は随所に確認できるが、海水系の場合よりも規模は小さく、変質層の厚みは薄いと思われる。フェロシライト質ガラスの上にノントロナイト組成のスメクタイトが確認できる(図 3.2.3-45)。またシリカやアルバイト質長石も多く認められ、それらはスメクタイトと共存している場合が多い(図 3.2.3-46、図 3.2.3-47)。



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.2681
 全酸素数: 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		44.94						
Na K	1.041	0.67	0.24	1.13	Na2O	0.91	0.23	0.9205
Mg K	1.253	1.56	0.21	4.94	MgO	2.58	0.50	2.0855
Al K	1.486	7.54	0.22	10.79	Al2O3	14.25	2.19	11.8958
Si K	1.739	24.84	0.26	68.28	SiO2	53.15	6.93	43.4700
K K	3.312	0.28	0.22	0.28	K2O	0.34	0.06	0.6289
Ca K	3.690	0.36	0.29	0.70	CaO	0.51	0.07	0.8691
Mn K	5.894	0.28	0.65	0.39	MnO	0.36	0.04	0.5566
Fe K	6.398	19.51	0.78	13.49	Fe2O3	27.90	2.74	39.5735
合計		100.00		100.00		100.00	12.75	

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.2042
 全酸素数: 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		43.65						
Na K	1.041	1.46	0.21	2.54	Na2O	1.97	0.51	1.8631
Mg K	1.253	1.39	0.19	4.56	MgO	2.30	0.46	1.7315
Al K	1.486	5.97	0.19	8.83	Al2O3	11.27	1.78	8.8692
Si K	1.739	23.35	0.22	66.43	SiO2	49.96	6.70	39.4920
K K	3.312	0.25	0.18	0.26	K2O	0.30	0.05	0.5489
Ca K	3.690	0.18	0.24	0.36	CaO	0.26	0.04	0.4268
Mn K	5.894	0.05	0.55	0.08	MnO	0.07	0.01	0.1067
Fe K	6.398	23.69	0.66	16.95	Fe2O3	33.87	3.42	46.9619
合計		100.00		100.00		100.00	12.98	

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.2189
 全酸素数: 14.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		38.53						
Na K	1.041	0.44	0.15	0.65	Na2O	0.60	0.12	0.3798
Mg K	1.253	0.00	0.12	0.01	MgO	0.00	0.00	0.0024
Al K	1.486	0.62	0.12	0.78	Al2O3	1.18	0.15	0.6818
Si K	1.739	17.83	0.13	42.77	SiO2	38.15	4.00	23.9317
S K	2.307	1.12	0.14	2.36	SO3	2.80	0.22	1.7913
Cl K								
K K	3.312	0.03	0.10	0.02	K2O	0.03	0.00	0.0498
Ca K	3.690	0.27	0.13	0.46	CaO	0.38	0.04	0.5344
Cr K	5.411	0.43	0.26	0.28	Cr2O3	0.63	0.05	0.7713
Mn K	5.894	0.88	0.31	1.07	MnO	1.13	0.10	1.4173
Fe K	6.398	41.71	0.33	50.31	FeO	53.66	4.71	68.6446
Co K	6.924	0.02	0.45	0.03	CoO	0.03	0.00	0.0366
Ni K	7.471	1.04	0.59	1.19	NiO	1.32	0.11	1.6530
Cu K	8.040	0.07	0.80	0.07	CuO	0.09	0.01	0.1059
合計		100.00		100.00		100.00	9.52	

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.2192
 全酸素数: 24.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		37.84						
Na K	1.041	0.98	0.17	1.43	Na2O	1.32	0.43	0.9215
Mg K	1.253	0.54	0.14	1.49	MgO	0.90	0.23	0.5139
Al K	1.486	1.03	0.14	1.28	Al2O3	1.95	0.39	1.2109
Si K	1.739	18.45	0.15	44.12	SiO2	39.46	6.66	26.3857
S K	2.307	2.81	0.17	5.88	SO3	7.01	0.89	4.7266
Cl K	2.621	0.02	0.08	0.04	Cl	0.02	0.00	0.0351
K K								
Ca K	3.690	0.24	0.16	0.41	CaO	0.34	0.06	0.4938
Cr K	5.411	0.37	0.31	0.24	Cr2O3	0.54	0.07	0.6811
Mn K	5.894	0.49	0.36	0.61	MnO	0.64	0.09	0.8422
Fe K	6.398	33.85	0.39	40.72	FeO	43.55	6.15	58.5612
Co K	6.924	0.61	0.53	0.70	CoO	0.78	0.11	1.0359
Ni K	7.471	1.88	0.69	2.15	NiO	2.39	0.32	3.1665
Cu K	8.040	0.89	0.94	0.94	CuO	1.11	0.14	1.4256
合計		100.00		100.00		100.00	15.54	

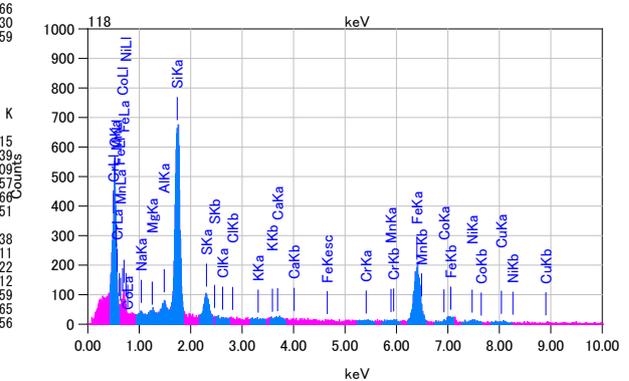
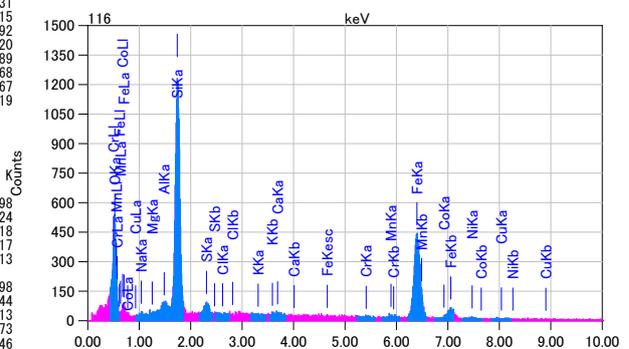
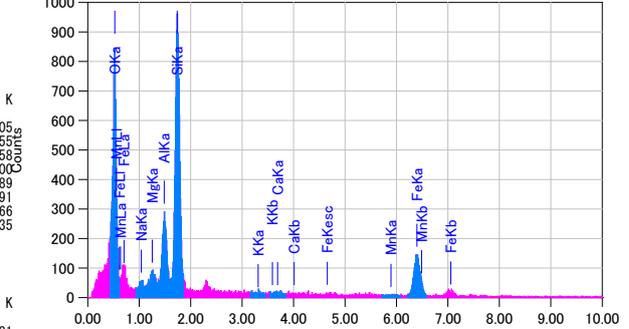
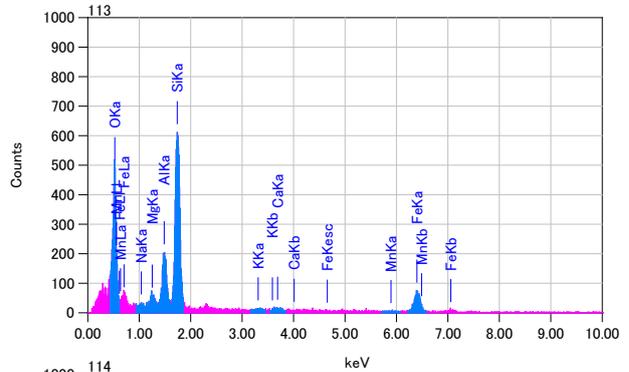
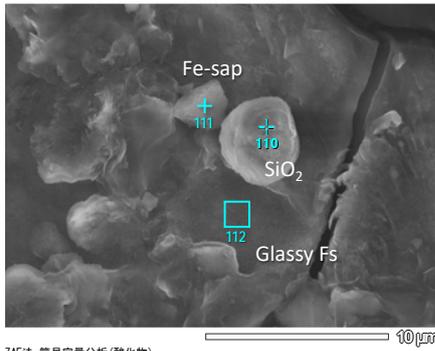


図 3.2.3-45 ガラス質フェロシライト上のノントロナイト質スメクタイト



ZAF法 簡易定量分析 (酸化物)
フィッティング係数: 0.2479
全酸素数: 24.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		51.09						
Na K	1.041	1.56	0.25	2.07	Na2O	2.10	0.51	2.6653 _g
Mg K	1.253	0.39	0.23	0.98	MgO	0.65	0.12	0.6222 _g
Al K	1.486	1.76	0.25	2.00	Al2O3	3.33	0.49	3.2444 _g
Si K	1.739	41.94	0.28	91.34	SiO2	89.71	11.22	86.8134 _g
K K								
Ca K	3.690	0.05	0.37	0.08	CaO	0.07	0.01	0.1214
Mn K	5.894	0.62	0.84	0.69	MnO	0.80	0.08	1.2389
Fe K	6.398	2.60	0.90	2.84	FeO	3.34	0.35	5.2944
合計		100.00		100.00		100.00	12.79	

ZAF法 簡易定量分析 (酸化物)
フィッティング係数: 0.2910
全酸素数: 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		38.69						
Na K	1.041	1.29	0.31	1.84	Na2O	1.73	0.51	1.3170
Mg K	1.253	0.36	0.26	0.97	MgO	0.59	0.13	0.3641
Al K	1.486	2.35	0.26	2.88	Al2O3	4.46	0.80	2.9580
Si K	1.739	22.81	0.29	53.49	SiO2	48.80	7.39	34.1059
K K								
Ca K	3.312	0.00	0.23	0.00	K2O	0.00	0.00	0.0078
Ca K	3.690	0.27	0.31	0.44	CaO	0.37	0.06	0.5578
Mn K	5.894	0.75	0.70	0.90	MnO	0.97	0.12	1.3054
Fe K	6.398	33.48	0.76	39.49	FeO	43.07	5.45	59.3842
合計		100.00		100.00		100.00	14.47	

ZAF法 簡易定量分析 (酸化物)
フィッティング係数: 0.2967
全酸素数: 14.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		36.18						
Na K	1.041	1.03	0.23	1.48	Na2O	1.39	0.28	0.9346
Mg K	1.253	0.73	0.20	1.98	MgO	1.21	0.19	0.6718
Al K	1.486	1.07	0.19	1.31	Al2O3	2.03	0.25	21.193
Si K	1.739	19.80	0.20	46.53	SiO2	42.36	4.37	27.4768
K K								
Ca K								
Mn K	5.894	0.11	0.49	0.13	MnO	0.14	0.01	0.1761
Fe K	6.398	41.10	0.53	48.58	FeO	52.88	4.56	69.5213
合計		100.00		100.00		100.00	9.65	

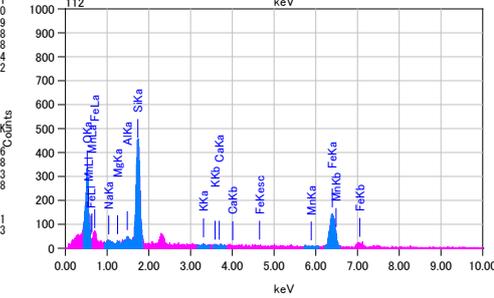
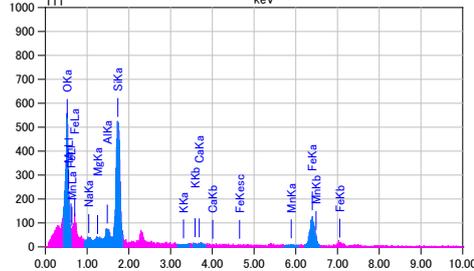
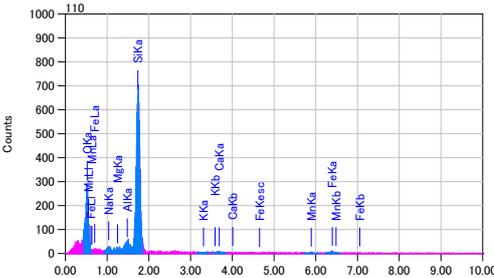
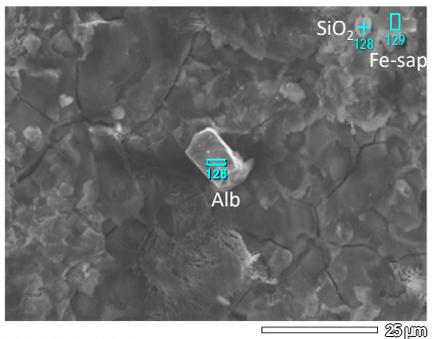


図 3.2.3-46 ガラス質フェロシライト上のシリカと鉄サポナイト沈殿物



ZAF法 簡易定量分析 (酸化物)
フィッティング係数: 0.1717
全酸素数: 8.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		47.60						
Na K	1.041	9.57	0.15	13.66	Na2O	12.90	1.12	18.3314 _g
Mg K	1.253	0.35	0.16	0.95	MgO	0.58	0.04	0.5520 _g
Al K	1.486	10.35	0.16	12.58	Al2O3	19.56	1.03	18.9065 _g
Si K	1.739	29.98	0.20	70.03	SiO2	64.14	2.87	57.3814 _g
K K								
Ca K	3.312	0.17	0.18	0.15	K2O	0.21	0.01	0.4038
Ca K	3.690	0.67	0.24	1.09	CaO	0.93	0.04	1.6606
Mn K	5.894	0.14	0.53	0.17	MnO	0.18	0.01	0.2985
Fe K	6.398	1.16	0.57	1.37	FeO	1.49	0.06	2.4657
合計		100.00		100.00		100.00	5.18	

ZAF法 簡易定量分析 (酸化物)
フィッティング係数: 0.1785
全酸素数: 24.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		51.58						
Na K	1.041	0.74	0.16	0.99	Na2O	1.00	0.24	1.2918
Mg K	1.253	0.39	0.15	0.98	MgO	0.64	0.12	0.6316
Al K	1.486	2.36	0.18	2.68	Al2O3	4.46	0.65	4.4138
Si K	1.739	42.33	0.18	92.51	SiO2	90.56	11.22	88.2724
K K								
Ca K	3.312	0.22	0.18	0.17	K2O	0.26	0.04	0.4859
Ca K	3.690	0.08	0.24	0.12	CaO	0.11	0.01	0.1802
Mn K	5.894	0.09	0.54	0.10	MnO	0.11	0.01	0.1735
Fe K	6.398	2.22	0.59	2.44	FeO	2.86	0.30	4.5507
合計		100.00		100.00		100.00	12.60	

ZAF法 簡易定量分析 (酸化物)
フィッティング係数: 0.3593
全酸素数: 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		42.60						
Na K	1.041	1.35	0.33	1.84	Na2O	1.82	0.48	1.8837
Mg K	1.253	6.12	0.29	15.82	MgO	10.15	2.08	8.2357
Al K	1.486	6.51	0.32	7.58	Al2O3	12.51	1.99	9.7513
Si K	1.739	23.29	0.37	52.10	SiO2	49.83	6.85	39.4604
K K								
Ca K	3.312	1.15	0.30	0.93	K2O	1.39	0.24	2.5467
Ca K	3.690	0.91	0.40	1.42	CaO	1.27	0.19	2.1289
Mn K	5.894	0.16	0.91	0.19	MnO	0.21	0.02	0.3219
Fe K	6.398	17.90	0.98	20.13	FeO	23.02	2.65	35.6713
合計		100.00		100.00		100.00	14.51	

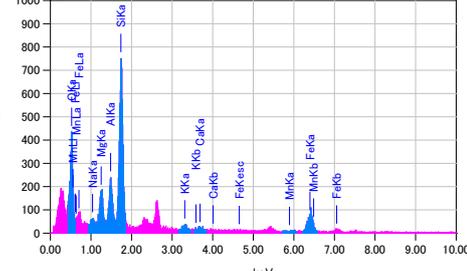
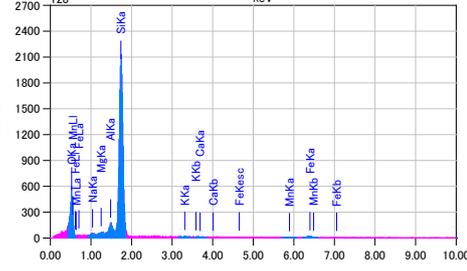
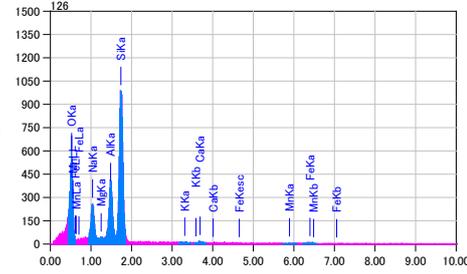
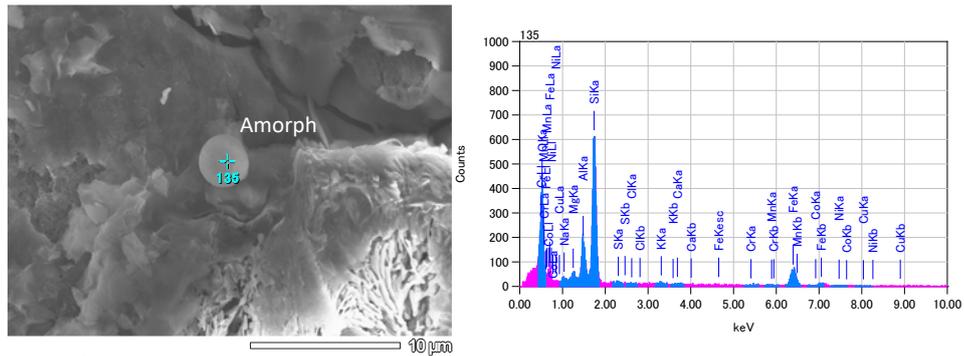


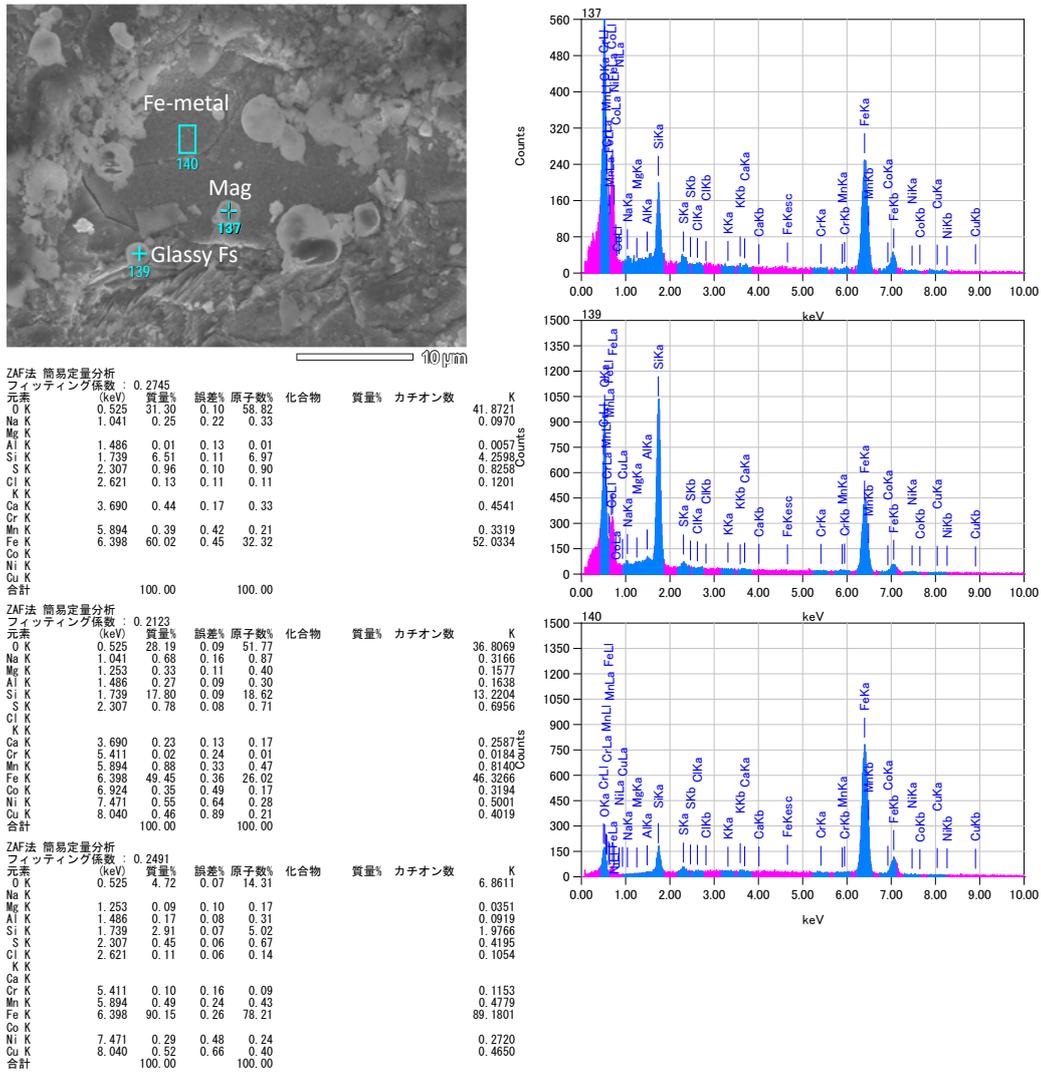
図 3.2.3-47 アルバイト、シリカ、鉄サポナイト沈殿物



ZAF法 簡易定量分析 (酸化物)
 フィッティング係数: 0.2458
 全酸素数: 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		43.60						
Na	1.041	1.14	0.21	1.64	Na2O	1.53	0.40	1.5349
Mg	1.253	1.63	0.19	4.42	MgO	2.70	0.54	2.1317
Al	1.486	7.21	0.19	8.83	Al2O3	13.63	2.16	11.1036
Si	1.739	25.59	0.22	60.17	SiO2	54.75	7.36	43.8592
S	2.307	0.52	0.27	1.07	SO3	1.30	0.13	0.9832
Cl								
Ca	3.312	0.51	0.19	0.43	K2O	0.61	0.10	1.1046
Cr	3.690	0.14	0.25	0.23	CaO	0.20	0.03	0.3283
Mn								
Fe	5.894	0.44	0.57	0.52	MnO	0.56	0.06	0.8487
Co	6.398	18.54	0.61	21.93	FeO	23.85	2.68	36.7713
Ni								
Cu	7.471	0.53	1.06	0.60	NiO	0.67	0.07	1.0386
合計	8.040	0.16	1.46	0.17	CuO	0.20	0.02	0.2960
合計		100.00		100.00		100.00	13.56	

図 3.2.3-48 サポナイト質の非晶質沈殿物



ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数: 0.2745

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	31.30	0.10	58.82				41.8721
Na	1.041	0.25	0.22	0.33				0.0970
Mg								0.0057
Al	1.486	0.01	0.13	0.01				4.2598
Si	1.739	6.51	0.11	6.97				0.8258
S	2.307	0.96	0.10	0.90				0.1201
Cl	2.621	0.13	0.11	0.11				0.4541
Ca								0.3319
Cr	3.690	0.44	0.17	0.33				52.0334
Mn								
Fe	5.894	0.39	0.42	0.21				
Co	6.398	60.02	0.45	32.32				
合計		100.00		100.00				

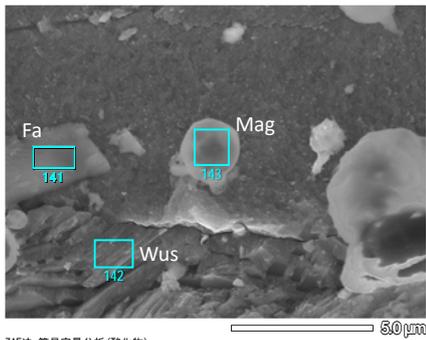
ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数: 0.2123

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	28.19	0.09	51.77				36.8069
Na	1.041	0.68	0.16	0.87				0.3166
Mg	1.253	0.33	0.11	0.40				0.1577
Al	1.486	0.27	0.09	0.30				0.1638
Si	1.739	17.80	0.09	18.62				13.2204
S	2.307	0.78	0.08	0.71				0.6956
Cl								
Ca	3.690	0.23	0.13	0.17				0.2587
Cr	5.411	0.02	0.24	0.01				0.0184
Mn	5.894	0.38	0.33	0.47				0.3140
Fe	6.398	49.45	0.36	26.02				46.3266
Co	6.924	0.35	0.49	0.17				0.3194
Ni	7.471	0.55	0.64	0.28				0.5001
Cu	8.040	0.46	0.89	0.21				0.4019
合計		100.00		100.00				

ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数: 0.2491

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	4.72	0.07	14.31				6.8611
Na								
Mg	1.253	0.09	0.10	0.17				0.0351
Al	1.486	0.17	0.08	0.31				0.0919
Si	1.739	2.91	0.07	5.02				1.9766
S	2.307	0.45	0.06	0.67				0.4196
Cl	2.621	0.11	0.06	0.14				0.1054
Ca								
Cr	5.411	0.10	0.16	0.09				0.1153
Mn	5.894	0.49	0.24	0.43				0.4779
Fe	6.398	90.15	0.26	78.21				89.1801
Co								
Ni	7.471	0.29	0.48	0.24				0.2720
Cu	8.040	0.52	0.66	0.40				0.4650
合計		100.00		100.00				

図 3.2.3-49 金属鉄上に共存するガラス質フェロシライト-磁鉄鉱



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
フィッティング係数: 0.2520
全検数: 4.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		31.26						
Na K	1.041	0.83	0.23	1.22	Na2O	1.12	0.07	0.6096g
Mg K	1.253	0.25	0.20	0.72	MgO	0.43	0.02	0.1959g
Al K	1.486	0.42	0.19	0.53	Al2O3	0.80	0.03	0.4051g
Si K	1.739	13.09	0.20	31.65	SiO2	28.00	0.95	15.6243g
K K	3.312	0.10	0.15	0.08	K2O	0.12	0.01	0.1646g
Ca K	3.690	0.12	0.20	0.20	CaO	0.16	0.01	0.2148g
Mn K	5.894	0.12	0.45	0.15	MnO	0.15	0.00	0.1774g
Fe K	6.398	53.31	0.48	65.44	FeO	69.22	1.97	82.6084g
合計		100.00		100.00		100.00	3.07	

ZAF法 簡易定量分析
フィッティング係数: 0.2778

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O K	0.525	18.54		0.07				26.5402
Na K	1.253	0.15	0.12	0.23				0.0604
Al K	1.739	3.08	0.09	4.09				1.9994
K K	3.312	0.07	0.11	0.07				0.0747
Ca K	5.894	1.16	0.30	0.79				1.0410
Mn K	6.398	76.90	0.33	51.37				70.2843
合計		100.00		100.00				

ZAF法 簡易定量分析
フィッティング係数: 0.3255

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O K	0.525	31.05		0.12				41.8930g
Na K	1.041	0.34	0.26	0.45				0.1368g
Mg K								
Al K	1.739	8.83	0.14	9.41				5.8368
K K	3.312	0.02	0.17	0.01				0.0147
Ca K	3.690	0.20	0.20	0.15				0.2086
Mn K	5.894	0.98	0.50	0.54				0.8411
Fe K	6.398	58.58	0.54	31.38				50.9793
合計		100.00		100.00				

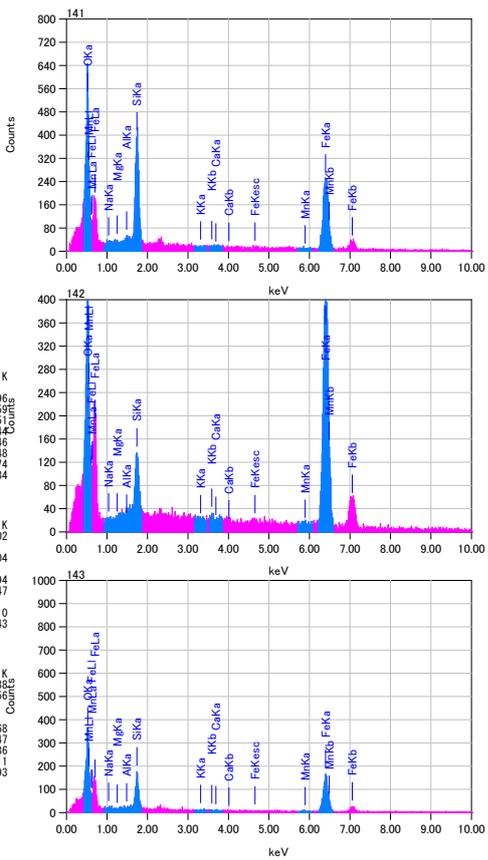
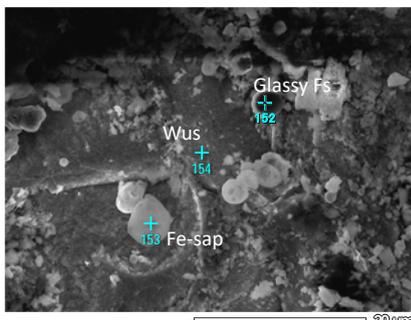


図 3.2.3-50 共存するウスタイト—磁鉄鉱—ファイヤライト



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
フィッティング係数: 0.2753
全検数: 6.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		35.97						
Na K	1.041	0.98	0.20	1.41	Na2O	1.31	0.11	0.8631g
Mg K	1.253	0.29	0.17	0.78	MgO	0.47	0.03	0.2573g
Al K	1.486	0.35	0.17	0.43	Al2O3	0.65	0.03	0.3862g
Si K	1.739	16.88	0.18	44.72	SiO2	40.39	1.79	25.9292g
S K	2.307	0.97	0.20	2.00	SiO3	2.41	0.08	1.5625g
Cl K								
K K	3.312	0.24	0.14	0.21	K2O	0.29	0.02	0.4473g
Ca K	3.690	1.11	0.42	1.34	MnO	1.43	0.05	1.8192g
Mn K	5.894	41.22	0.46	49.11	FeO	53.03	1.97	66.7363g
Fe K	6.398							
合計		100.00		100.00		100.00	4.09	

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
フィッティング係数: 0.2738

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		39.90						
Na K	1.041	1.32	0.27	1.90	Na2O	1.78	0.14	1.4219g
Mg K								
Al K	1.486	3.01	0.23	3.68	Al2O3	5.68	0.27	3.9443g
Si K	1.739	24.18	0.26	56.91	SiO2	51.73	2.07	37.4104g
S K	2.307	0.16	0.30	0.32	SiO3	0.39	0.01	0.2713g
Cl K	2.621	0.03	0.13	0.06	Cl	0.03	0.00	0.0591g
K K	3.312	0.14	0.21	0.12	K2O	0.17	0.01	0.2780g
Ca K								
Mn K	5.894	0.72	0.64	0.87	MnO	0.93	0.03	1.2828g
Fe K	6.398	30.54	0.69	36.15	FeO	39.29	1.32	55.3324g
合計		100.00		100.00		100.00	3.84	

ZAF法 簡易定量分析
フィッティング係数: 0.3090

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O K	0.525	23.40		0.09				32.1836
Na K	1.041	0.23	0.20	0.34				0.0883
Mg K								
Al K	1.486	0.25	0.11	0.31				0.1287
Si K	1.739	5.08	0.10	6.14				3.3588
S K	2.307	0.47	0.09	0.49				0.4134
Cl K	2.621	0.22	0.10	0.21				0.2056
K K	3.312	0.12	0.13	0.10				0.1180
Ca K	3.690	0.32	0.15	0.27				0.3391
Mn K	5.894	1.45	0.36	0.89				1.2839
Fe K	6.398	68.48	0.39	41.61				61.8827
合計		100.00		100.00				

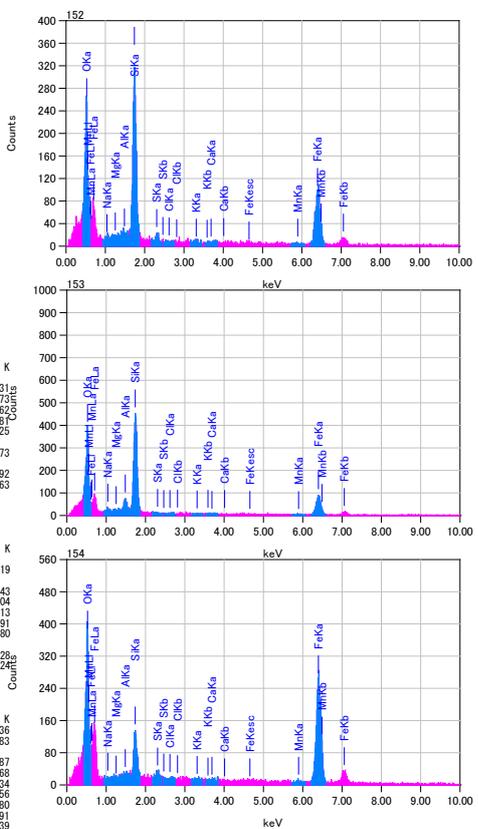


図 3.2.3-51 ウスタイト上のフェロシリイト質ガラスと鉄サポナイト

淡水系における変質は鱗片状の特徴的な水酸化鉄の沈殿は見られずに、板状のウスタイト質の酸化物が支配的である。また金属鉄上のフェロシライト質ガラスの発達は弱く、グリーンライトが少ない。海水系と同時にガラス質における組成の変動が大きく、しばしばファイヤライト結晶の生成が認められる。同時にスメクタイト組成やフェロシライト組成の非晶質な球状沈殿相が多い特徴がある

8) XRD 分析

海水系および淡水系試験の炭素鋼近傍試料において、完全不定法位 XRD 測定を行い、リートベルト解析を行った。結果を図 3.2.3-52 と図 3.2.3-53 に示す。両者の違いとしてまず石英の量の違いが顕著に表れている。海水系の方が淡水系よりも炭素鋼の反応性が良いが、その Fe は SiO₂ を消費して例えば FeSiO₃ などの単純鉄ケイ酸塩に変換されていると解釈できる。

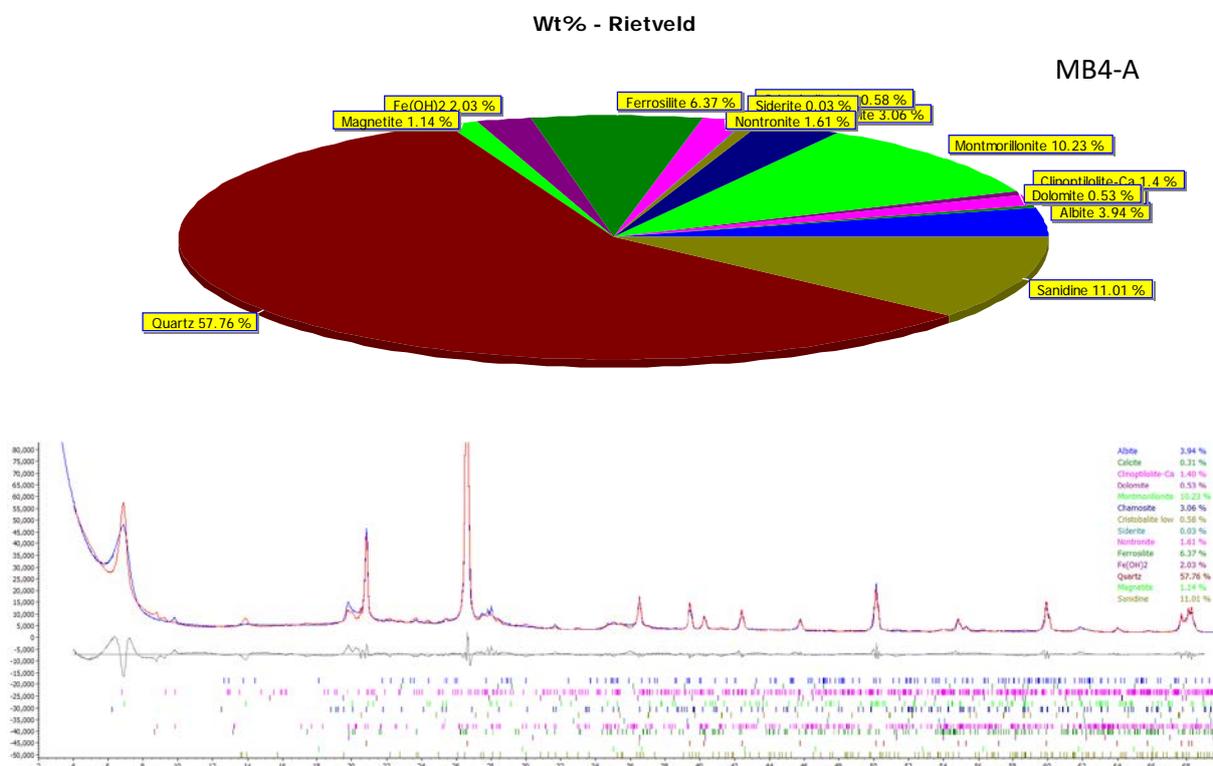


図 3.2.3-52 MB4-A 試料（炭素鋼近傍）の XRD リートベルト解析結果

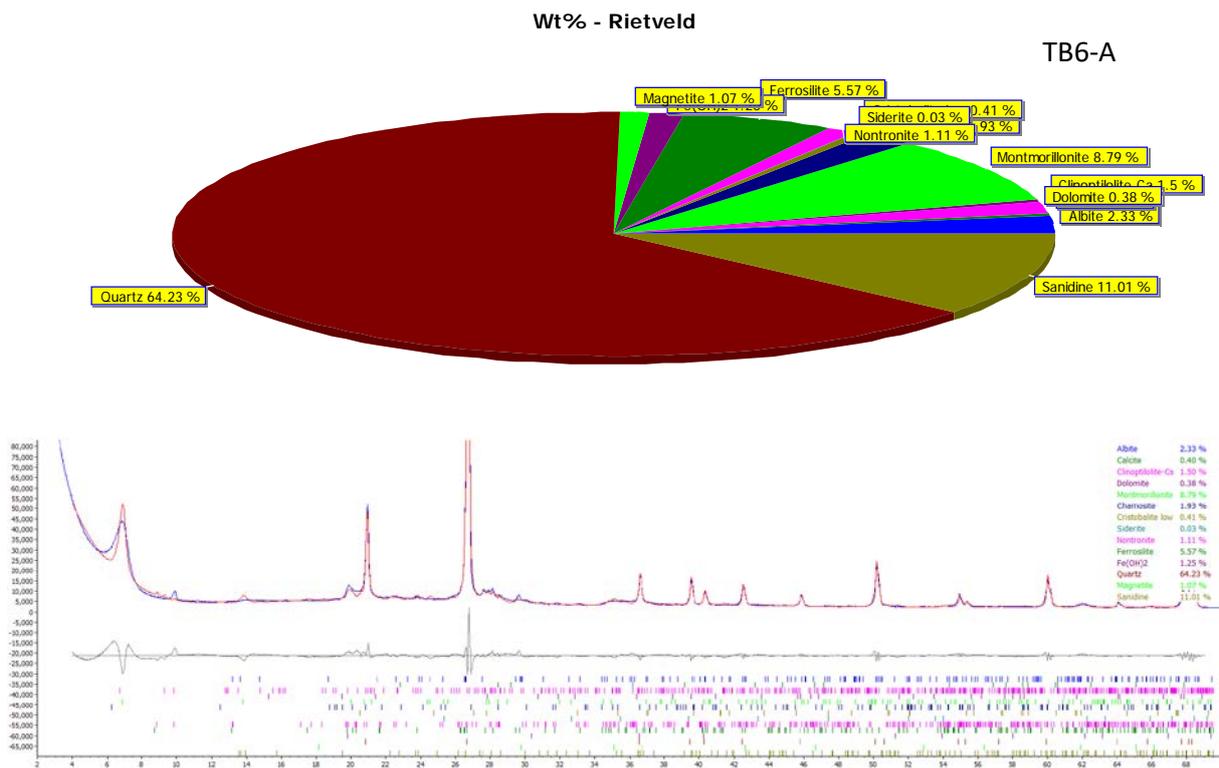


図 3.2.3-53 TB6-A 試料（炭素鋼近傍）の XRD リートベルト解析結果

9) マイクロ XRD 分析

炭素鋼接触部(MB4_1, TB6_1)と非接触部試料(MB4_2, TB6_3)のマイクロチップをそれぞれピンセットで取り出し、その表面についてマイクロ XRD 測定した。測定結果を図 3.2.3-54 に示す。炭素鋼接触部は海水系では石膏が強く、また弱いピークであるが鉄オリビンのファイヤライトが検出された。非接触部では石英とサニディン、サポナイトのピークが強い。一方で、淡水系では炭素鋼接触部で石膏が、非接触部では石膏は弱く、カルサイトと緑泥石にピークが強い特徴が確認できた。

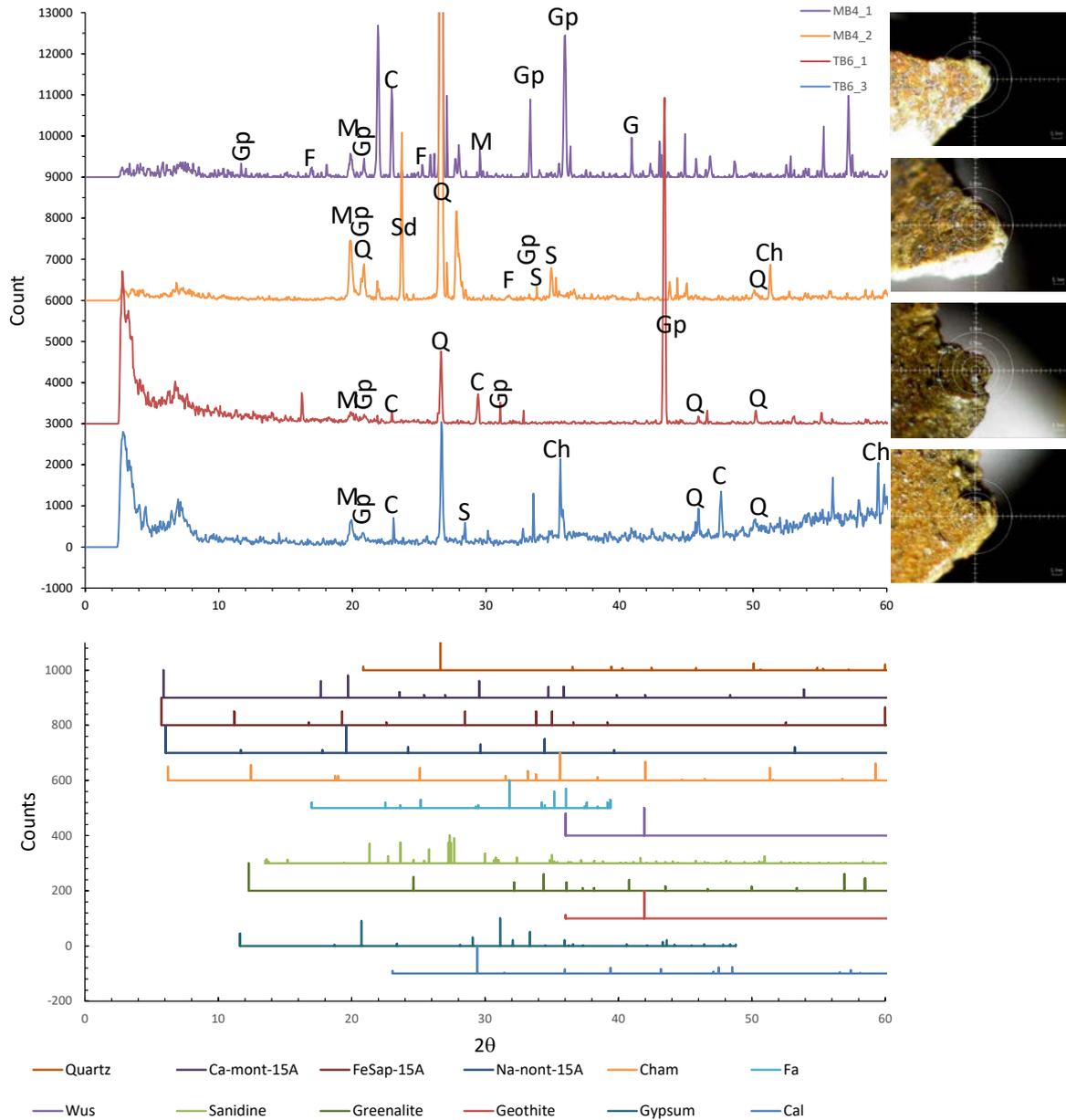


図 3.2.3-54 炭素鋼接触ベントナイトの界面試料のマイクロ XRD 分析(Gp: gypsum; F: fayalite; M: montmorillonite; C: calcite; G: goethite; Q: quartz, S: saponite; Ch: chamosite; Sd: sanidine)

10) 湿度制御 XRD 測定によるベントナイト分析

スメクタイトの(001)層間の陽イオンの水和状態、すなわち膨潤量の違いは湿度を変化させながら行う XRD 測定で可視化できる。この層間陽イオンと d_{001} 距離の相対湿度に対する変化を図 3.2.3-55 に示す。図 3.2.3-56 と図 3.2.3-57 には各カラムから回収した炭素鋼接触変質ベントナイト(直上 5 mm を平均化)の測定結果を示す。

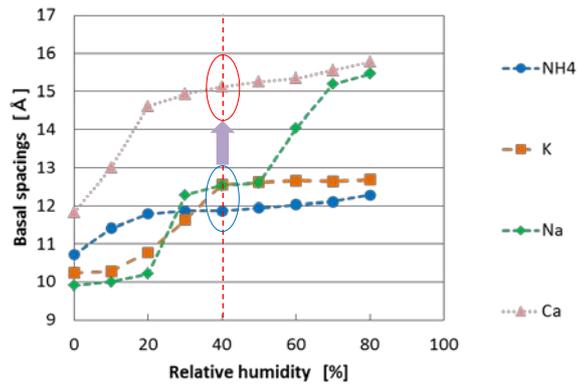


図 3.2.3-55 相対湿度と陽イオン交換後モンモリロナイトの d_{001} 距離の関係

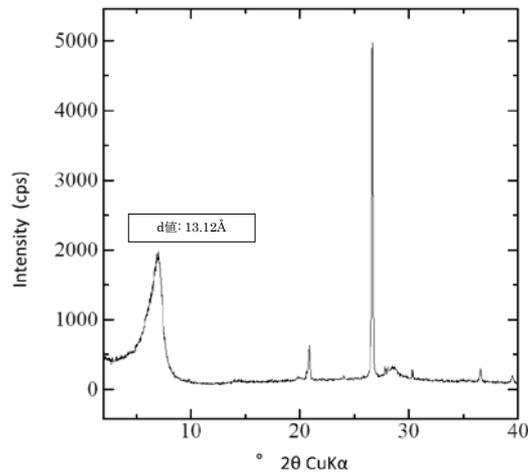


図 3.2.3-56 MB4 試料のベントナイトの湿潤制御 XRD 測定

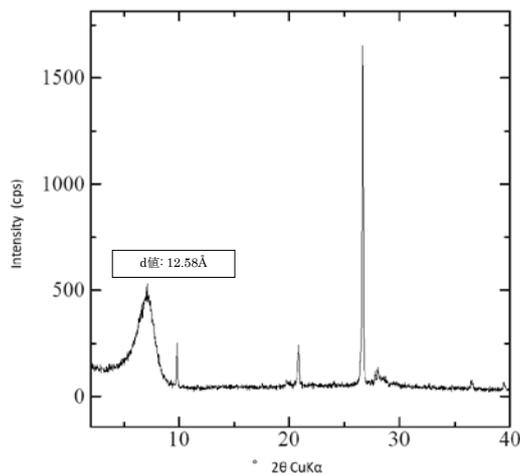


図 3.2.3-57 TB6 試料のベントナイトの湿潤制御 XRD 測定

この結果より取得した d_{001} 値を昨年度の試料 ((1)鉄部接触ベントナイト試料を含む) と合わせて表 3.2.3-9 にまとめて示す。

表 3.2.3-9 湿度制御 XRD 測定結果のまとめ

No.	溶液	溶接法	試験期間 (y)	試料 ID	試験片No	d ₀₀₁ (Å) dry	d ₀₀₁ (Å) wet
1	人工海水	TIG	5	SW-TIG-5	T5301	12.09	13.16
2	人工淡水			FW-TIG-5	T5105	12.39	12.68
3			10	FW-TIG-10	T5202	12.39	12.77
4	人工海水	MAG	5	SW-MAG-5	M5300	12.24	12.84
5			10	SW-MAG-10	M5109	12.02	13.00
6	人工淡水		5	FW-MAG-5	M5303	12.32	12.73
7			10	FW-MAG-10	M5104	12.16	12.66
8	人工海水	EBW	5	SW-EBW-5	E5300	12.09	12.75
9			10	SW-EBW-10	E5201	11.80	12.87
10	人工淡水		5	FW-EBW-5	E5104	12.39	12.61
11			10	FW-EBW-10	E5202	12.55	12.75
12	鉄部接触ベントナイト試料			接触試料-1	Case1	12.95	
13				接触試料-2	Case2	12.83	
14	人工海水	None	10	MB4	Unknown		13.12
15	人工淡水	none	10	TB6	Unknown		12.58

海水系と淡水系における反応時間と d₀₀₁ 値の関係を図 3.2.3-58 に示す。海水系の方が時間とともに 2 価の陽イオン Fe²⁺ の取り込みによって d₀₀₁ 距離が長くなっていることがわかる。

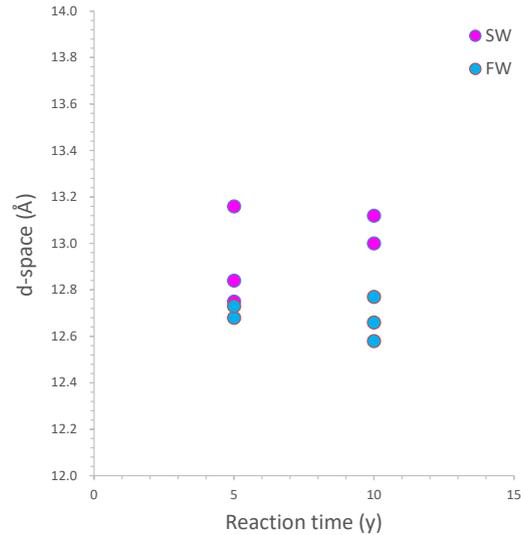


図 3.2.3-58 海水系と淡水系における反応時間と d_{001} 距離の関係

11) ベントナイトの CEC 測定

XRD, XRF 測定と同一粉碎試料について、CEC 測定を行った。結果を表 3.2.3-10 表 3.2.3-10 に示す。

表 3.2.3-10 炭素鋼接触ベントナイトの CEC 測定結果

Sample ID	n	Ca [meq/100g]	Mg [meq/100g]	K [meq/100g]	Na [meq/100g]	Cation extracted [meq/100g]	CEC [meq/100g]	Fe [meq/100g]
MB4-A	1	13.32	4.16	2.25	36.24	55.97	59.90	0.010
	Ave.	13.32	4.16	2.25	36.24	55.97	59.90	0.010
MB4-B	1	12.88	4.40	1.77	40.31	59.36	56.30	0.006
	Ave.	12.88	4.40	1.77	40.31	59.36	56.30	0.006
TB6-A	1	24.74	1.11	0.95	33.40	60.21	58.03	0.018
	Ave.	24.74	1.11	0.95	33.40	60.21	58.03	0.018
TB6-B	1	18.53	0.74	0.80	28.91	48.99	58.10	0.020
	Ave.	18.53	0.74	0.80	28.91	48.99	58.10	0.020

12) 炭素鋼のラマン分光分析

グローブボックス内で回収したばかりの炭素鋼試料は、他の機器分析に先だってラマン分光分析に供された。なぜなら、ラマン分光分析は完全な非接触非破壊分析が可能であるからである。アルゴン雰囲気グローブボックスでガラスバイアル瓶に封入された炭素鋼片は、昨年と同様にベンチトップのラマン分光分析装置によって終端から中央にかけて数か所において Z ステージを制御しながら測定した。図 3.2.3-59 と図 3.2.3-60 にその結果を示す。

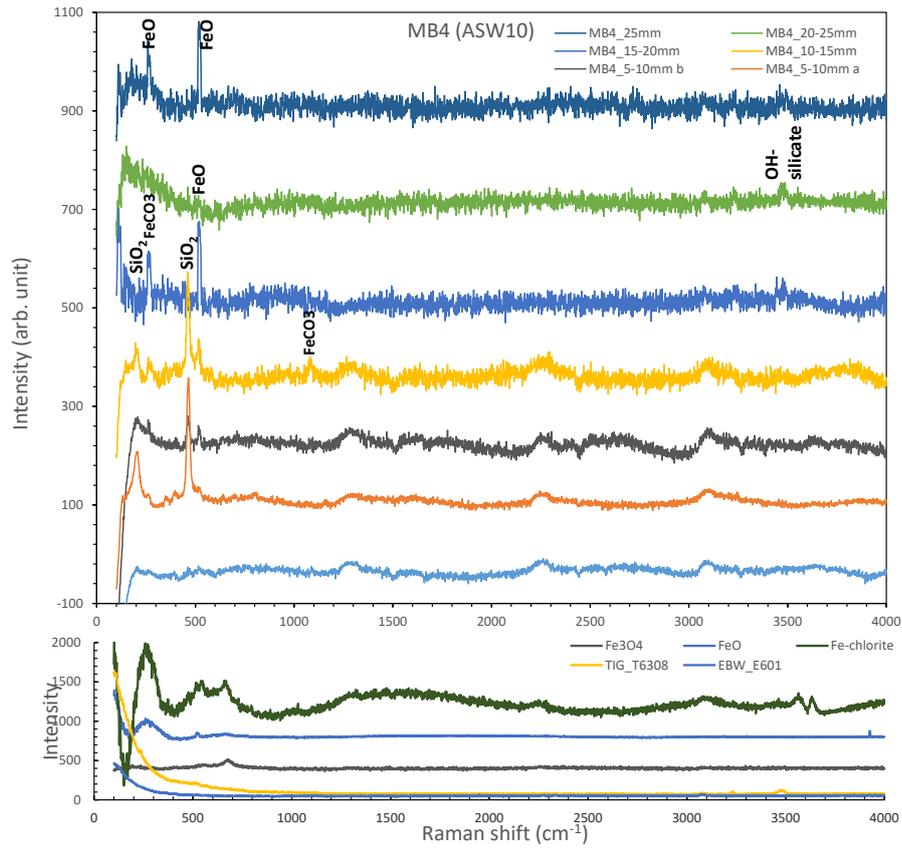


図 3.2.3-59 MB4 試料のラマン分光分析結果

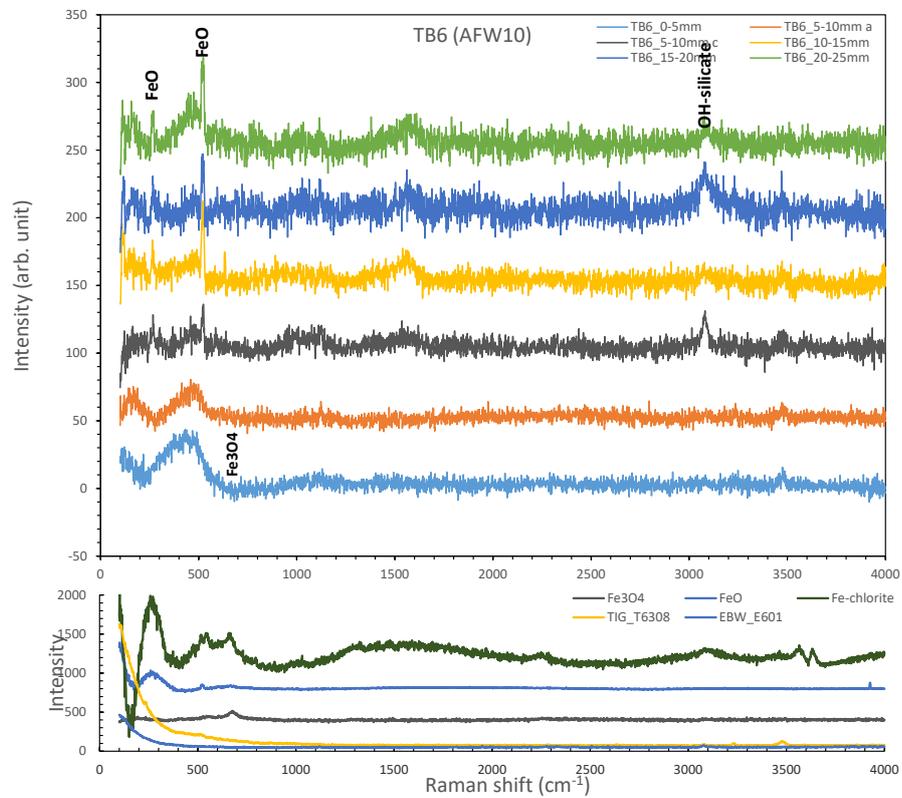


図 3.2.3-60 TB6 試料のラマン分光分析結果

海水系試料では、昨年溶接ゾーンがある炭素鋼試験で実施したラマン分光測定結果と比べて、シデライトのピークが弱く、石英とウスタイト(FeO)のシャープなピークが顕著である。通水窓から遠い場所(炭素鋼終端部)で石英のピークが強い。一方、淡水系試料では、ウスタイトと粘土鉱物のOH由来のピークのみが観測され、終端部(通水窓から遠い場所)にはマグネタイトのピークが確認できる。

13) FETEM-EDS 観察

変質が顕著な試料について、結晶粒子の超微細観察、組成分析、電子線回折パターン解析などの詳細な分析を行った。観察は、変質相の存在確率が高い炭素鋼表面の被膜に注目して実施した。試料の回収は主に炭素鋼中央部の角をデザインカッターでスクレイプする方法を採用した。得られた破片はエタノール中でメノウ乳鉢粉碎し、小型遠沈管に保管し、その一部をピックアップして分散処理後、マイクログリッド上に滴下して観察試料とした。

a MB4(ASW10)

観察結果を図 3.2.3-61 に示す。2つの領域において制限視野電子線回折(SAED)と EDS 分析を実施した。領域1は SAED と EDS データからノントロナイト質のスメクタイトである(図 3.2.3-62)。粒子先端部分の格子像を図 3.2.3-63 に示す。

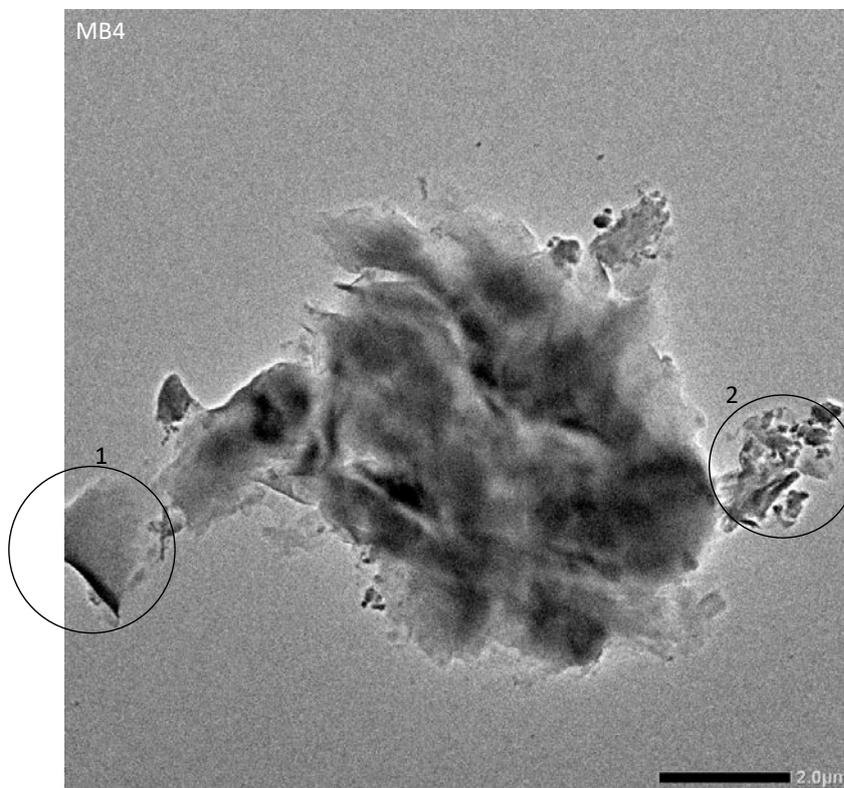


図 3.2.3-61 変質相を伴うモンモリロナイト粒子(MB4、その1)

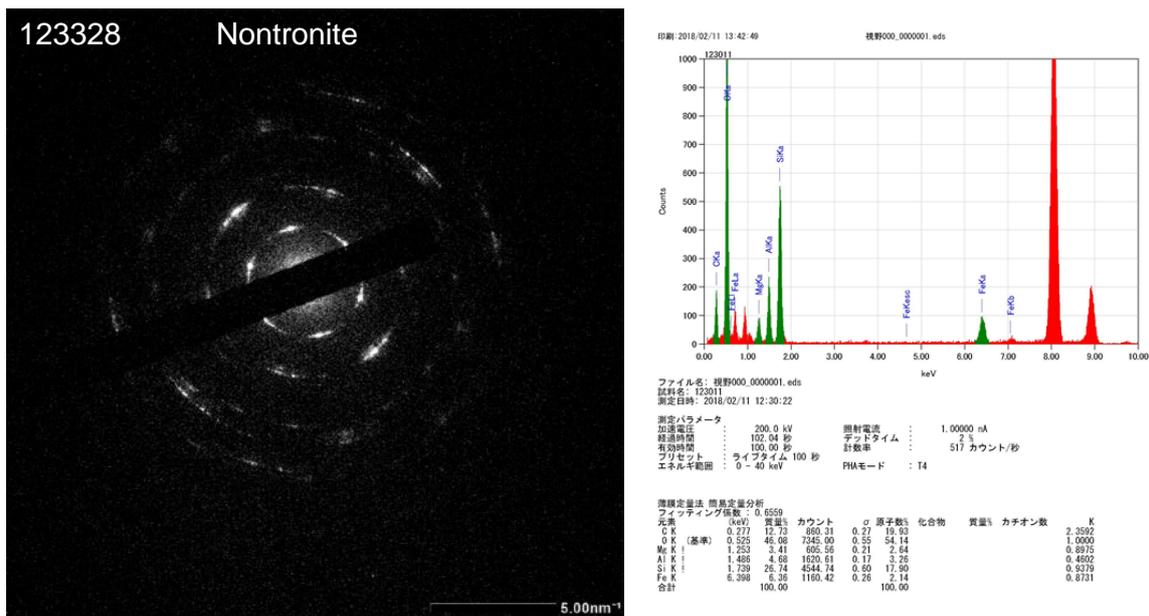


図 3.2.3-62 MB4 試料 (領域 1) の SAED パターンと EDS スペクトル

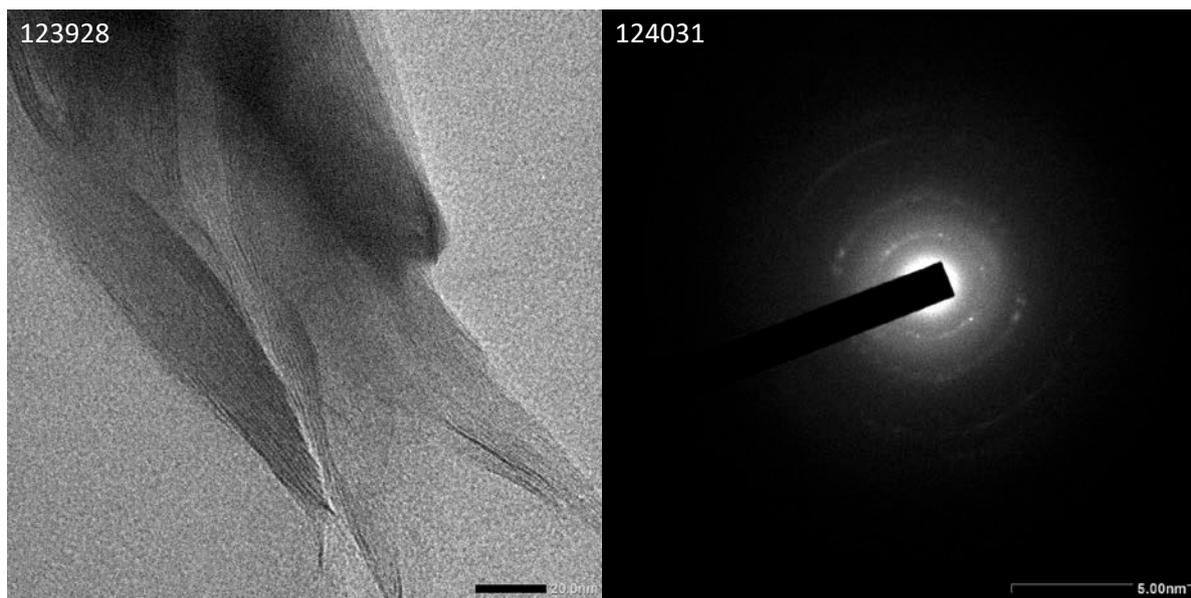


図 3.2.3-63 MB4 試料 (領域 1 下部) のスメクタイトとその SAED パターンと EDS スペクトル

視野 2 では、100-400 nm 大のシリカ粒子が多く観察できる (図 3.2.3-64)。粒子 2-1 ではトリディマイトに帰属するスポットが確認できた (図 3.2.3-65)。粒子 2-2 は多結晶体であるが、対称性の高いスポットは磁鉄鉱を示している。

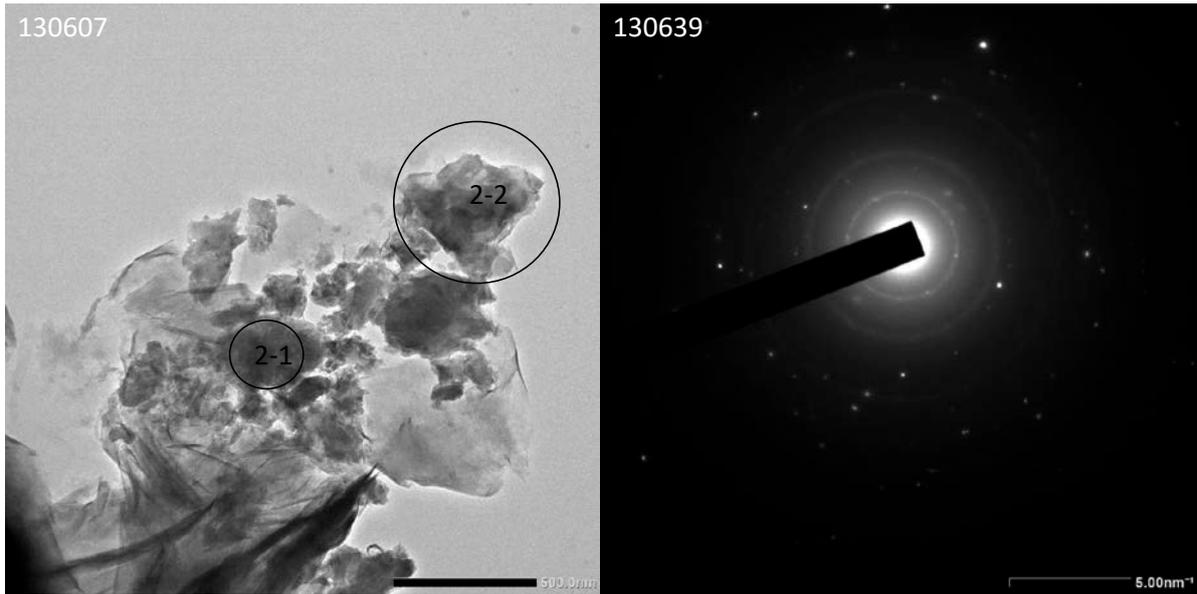


図 3.2.3-64 シリカを伴うモンモリロナイト(MB4)

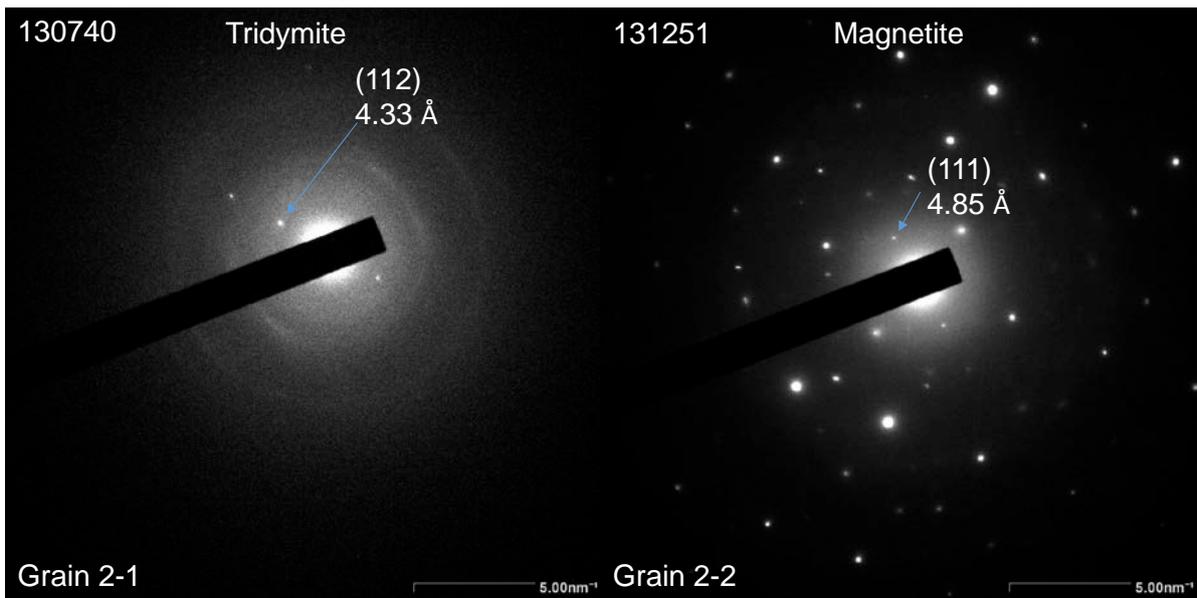


図 3.2.3-65 粒子 2-1 および 2-2 のトリディマイトと磁鉄鉱を示す SAED パターン

次に異なる視野における観察結果を図 3.2.3-66 に示す。

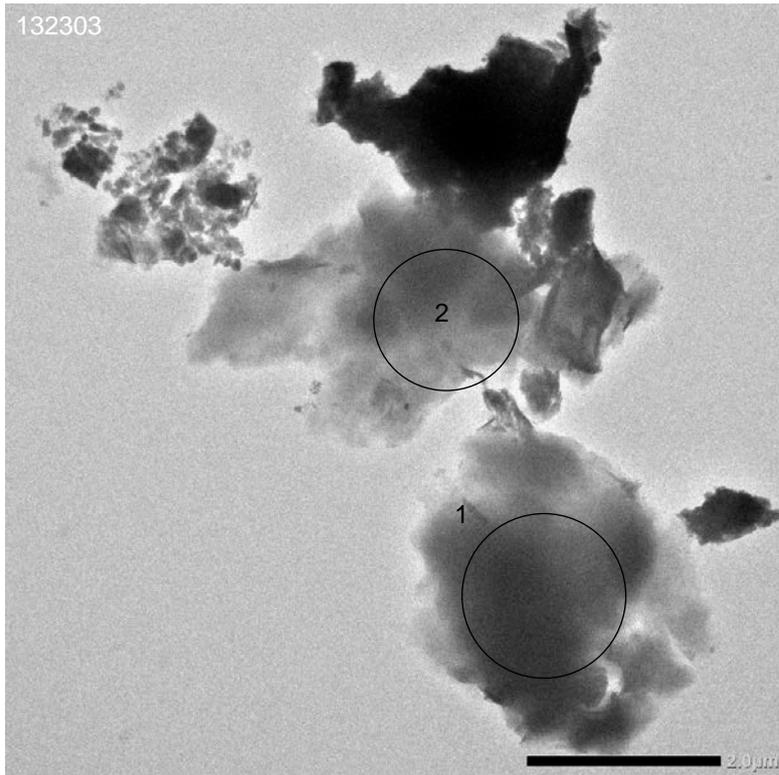


図 3.2.3-66 変質相を伴うモンモリロナイト粒子(MB4、その2)

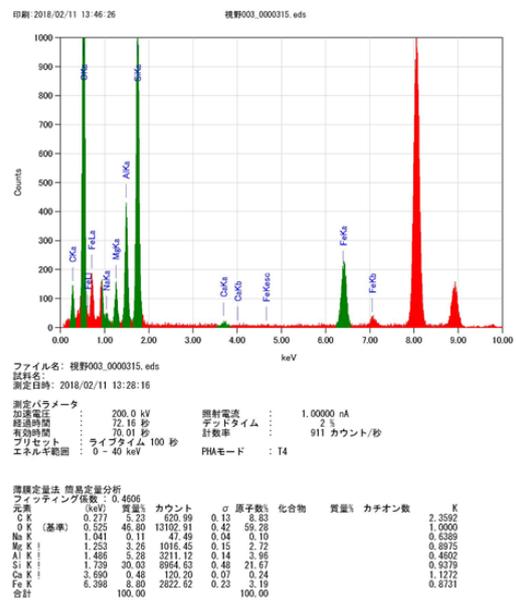
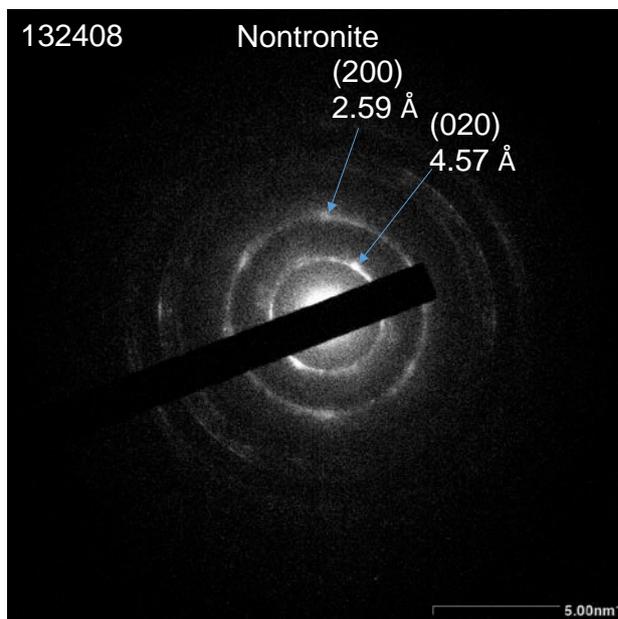


図 3.2.3-67 視野1のSAEDパターンとEDSデータ

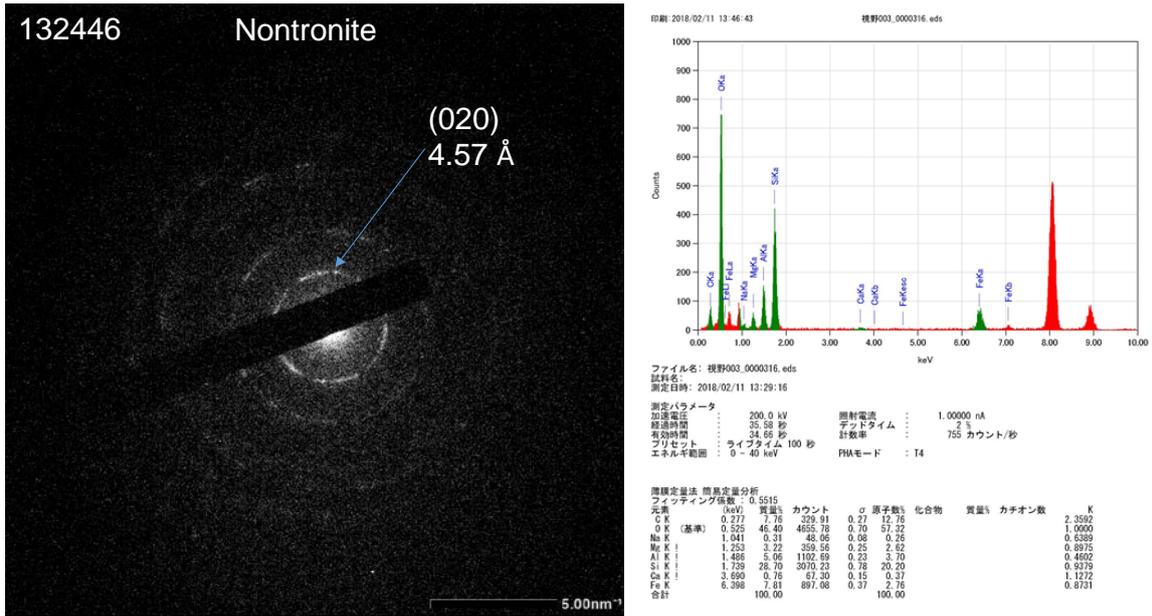


図 3.2.3-68 視野 2 の SAED パターンと EDS データ

観察されたスメクタイト粒子は SAED パターンや EDS データからノントロナイトであった。これはシリカ鉱物のトリディマイトや鉄酸化物鉱物の磁鉄鉱と共存していることがわかる。

b TB6

淡水系試料の TEM 観察結果を図 3.2.3-69 に示す。

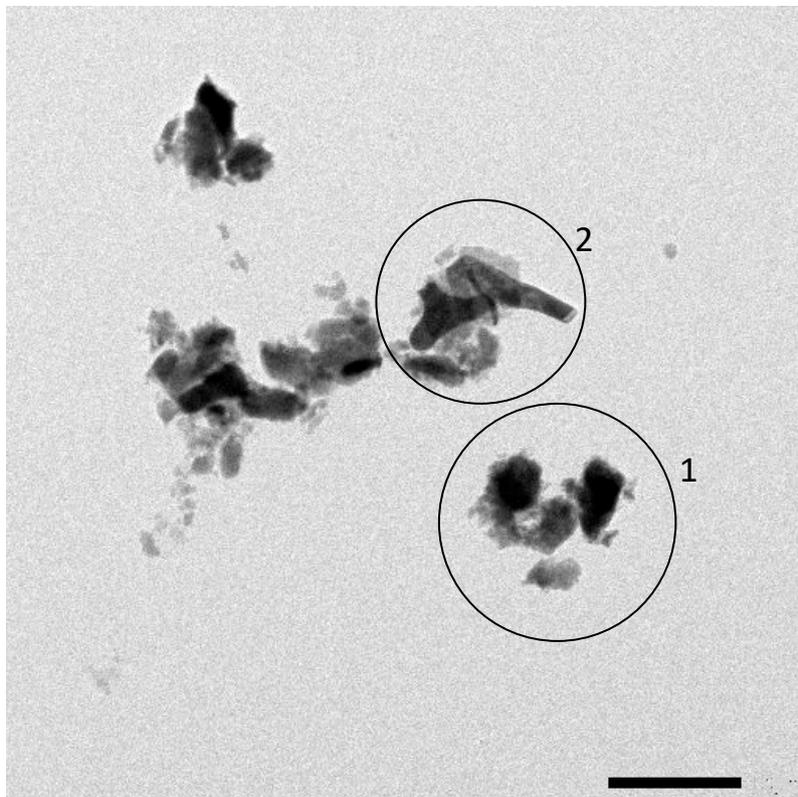


図 3.2.3-69 TB6 試料の TEM 観察

この中の2つの視野について詳細な観察を行った。視野1についての結果を図 3.2.3-70 に示す。EDS 分析を行った2つの粒子で異なる SAED パターンを得た。粒子 EDS1 では典型的な磁鉄鉱の SAED パターンが示され、この EDS データは Fe, O で構成される組成を示している (図 3.2.3-71)。特に強い SAED を生成した粒子を特定すると 10 nm 大の微粒子であることがわかり、その格子像が示されている。また粒子 EDS2 では結晶相は無いかもしれないもしくは非常に微細であることがわかる。EDS 分析値は Si-rich 組成を示している (図 3.2.3-71)。

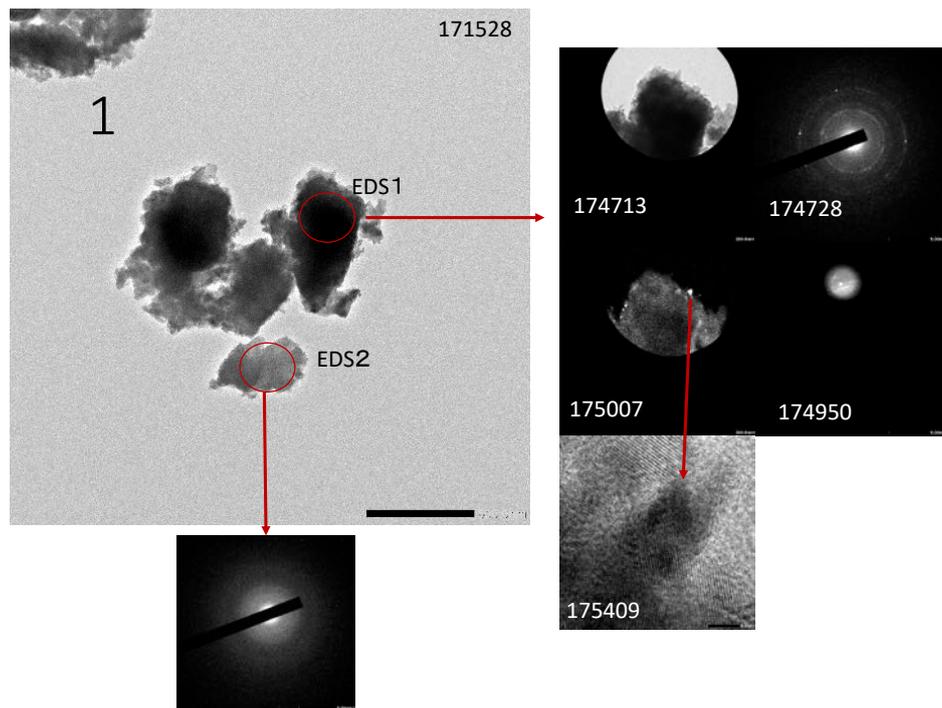
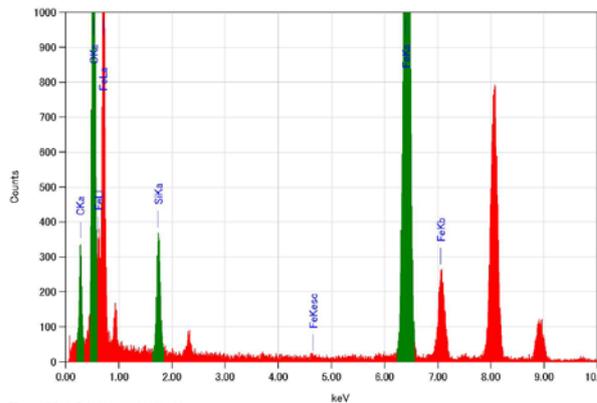


図 3.2.3-70 TB6 試料の TEM 観察(視野 1)

EDS1:視野0



ファイル名: 視野000_0000001.eds
 試料名:
 測定日時: 2018/01/26 17:18:28

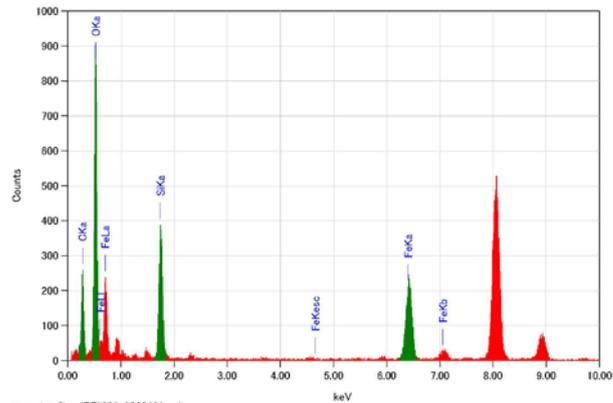
測定パラメータ
 加速電圧: 200.0 kV
 経過時間: 103.62 秒
 有効時間: 100.00 秒
 プリセット: ライブタイム 100 秒
 エネルギ範囲: 0 - 40 keV

照射電流: 1.00000 nA
 デッドタイム: 3 %
 計数率: 1058 カウント/秒
 PHAモード: T4

薄膜定定量法 簡易定定量分析
 フィッティング係数: 0.2816

元素	(keV)	質量%	カウント	σ	原子%	化合物	質量%	カチオン数	K
C K	0.277	1.87	1472.00	0.13	15.95				2.7020
O K	0.525	39.07	17243.00	0.31	59.42				1.1453
Si K	1.739	3.53	2825.07	0.10	3.05				0.6309
Fe K (基準)	6.398	49.53	25033.35	0.43	21.58				1.0000
合計		100.00			100.00				

EDS2:109



ファイル名: 視野001_0000109.eds
 試料名:
 測定日時: 2018/01/26 17:39:18

測定パラメータ
 加速電圧: 200.0 kV
 経過時間: 101.53 秒
 有効時間: 100.00 秒
 プリセット: ライブタイム 100 秒
 エネルギ範囲: 0 - 40 keV

照射電流: 1.00000 nA
 デッドタイム: 1 %
 計数率: 341 カウント/秒
 PHAモード: T4

薄膜定定量法 簡易定定量分析
 フィッティング係数: 0.4803

元素	(keV)	質量%	カウント	σ	原子%	化合物	質量%	カチオン数	K
C K	0.277	21.26	1250.52	0.38	33.12				2.3592
O K (基準)	0.525	40.17	5575.37	0.55	47.00				1.0000
Si K	1.739	20.98	3104.72	0.57	13.98				0.9379
Fe K	6.398	17.60	2797.55	0.45	5.90				0.6731
合計		100.00			100.00				

図 3.2.3-71 TB6 試料の EDS 分析(視野 1)

視野 2 では、折れ曲がった形状の比較的電子線の透過率の低い粒子が観察でき、その粒子結晶質である SAED パターンと格子像が得られたが、その紐状粒子に付着した微粒子はファイアライトと磁鉄鉱に帰属できるパターンが確認できた (図 3.2.3-72)。STEM 観察結果からは紐状粒子は FeC 成分で構成されていることが示唆されている (図 3.2.3-73)。

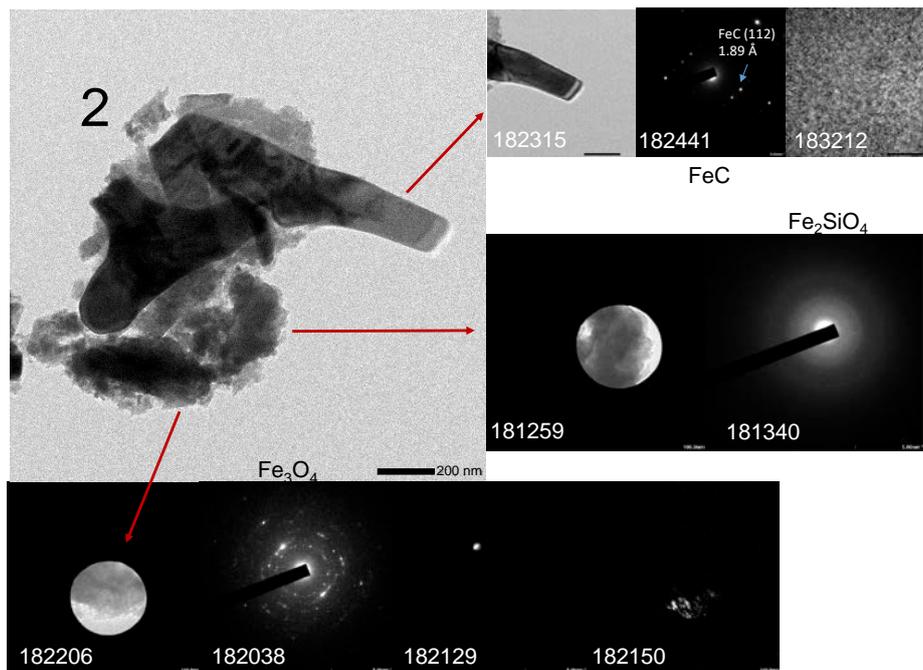


図 3.2.3-72 TB6 試料の TEM 観察(視野 2)

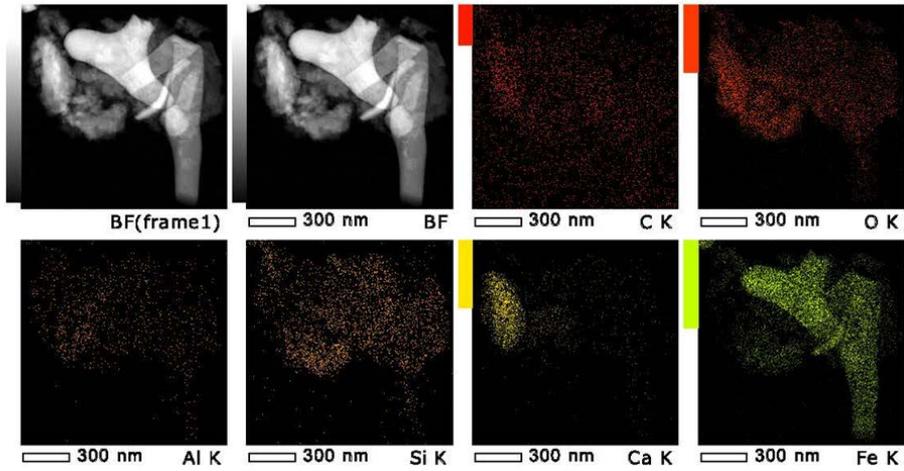


図 3.2.3-73 TB6 試料の STEM 観察(視野 2)

視野 3 では Fe ケイ酸塩、磁鉄鉱、カルサイトの混在する SAED パターンが得られた (図 3.2.3-74)。STEM 観察結果は整合的であった (図 3.2.3-75)。

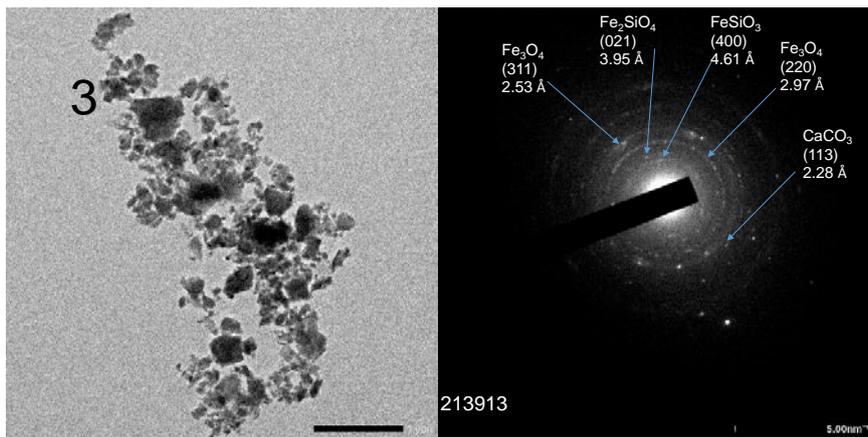


図 3.2.3-74 TB6 試料の TEM 観察(視野 3)

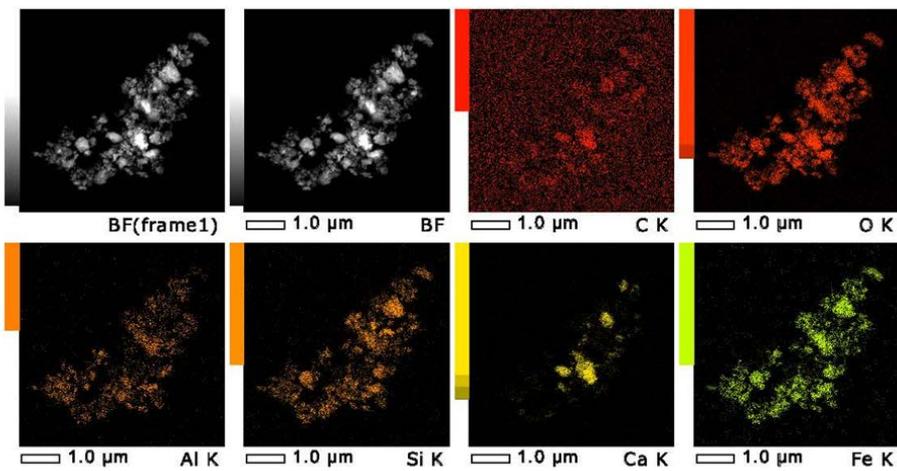


図 3.2.3-75 TB6 試料の STEM 観察(視野 3)

14) X線 CT 測定

大気の侵入を遮断したフィルムで封じた円筒形カラム内試料の測定を行い、画像解析から変質状態の評価を行った。3枚の炭素鋼が円盤状のベントナイト中央に埋め込まれており、それらの界面には輝度が高いリムがあり、人工海水系試料の ASW10-MB の方がやや厚かった(図 3.2.3-76、図 3.2.3-77)。また炭素鋼片はカラムの厚み半分の位置に配置されているが、片側は炭素鋼片の厚み 2 mm 分だけベントナイトが薄い。これがカラム上面側(ポッド内に収納したときの向き)なった状態で浸漬されており、CT 画像の輝度が高く、上側がより変質していることを示唆している。また人工海水系試料の ASW10-MB では、炭素鋼表面に腐食孔が複数確認できた。

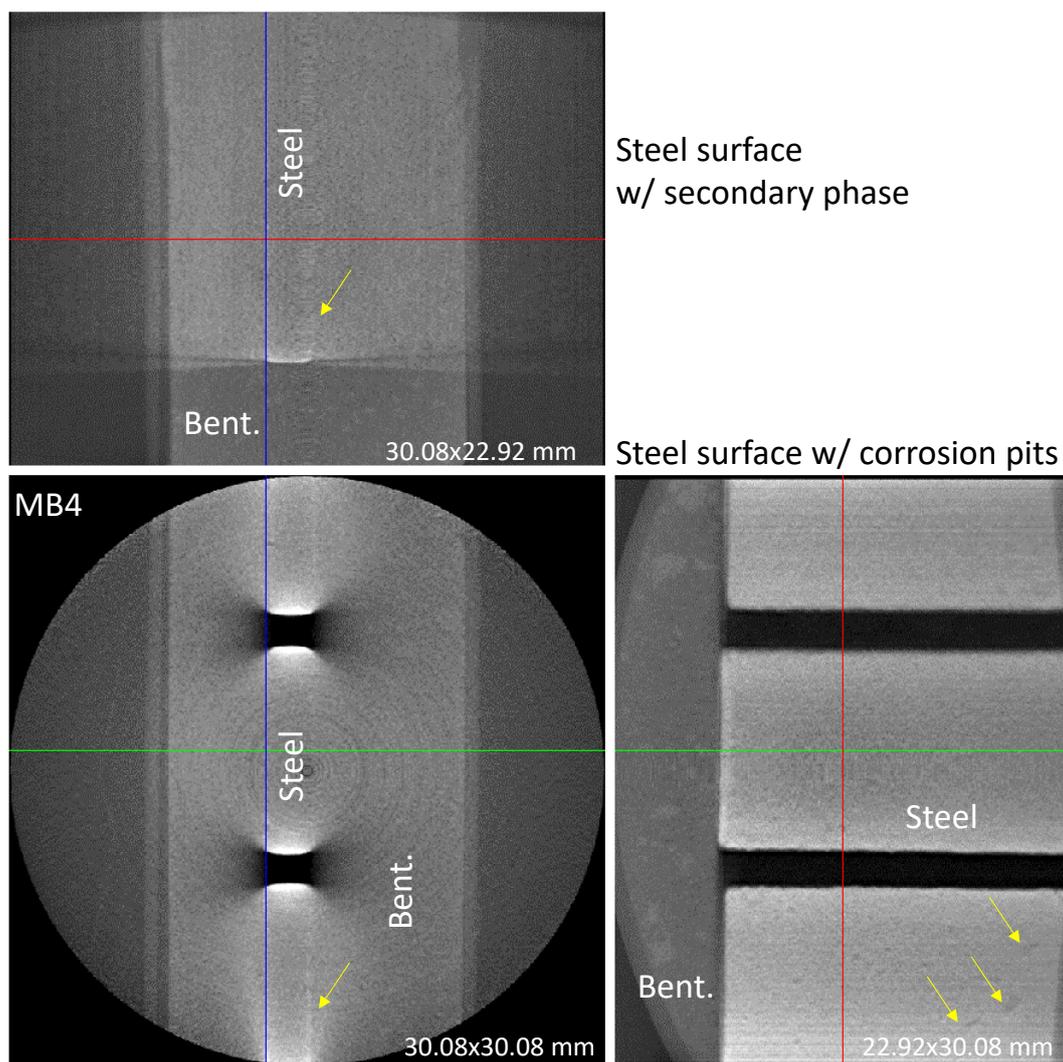


図 3.2.3-76 ベントナイト中の炭素鋼 ASW10-MB 試験片のナノ XCT 画像

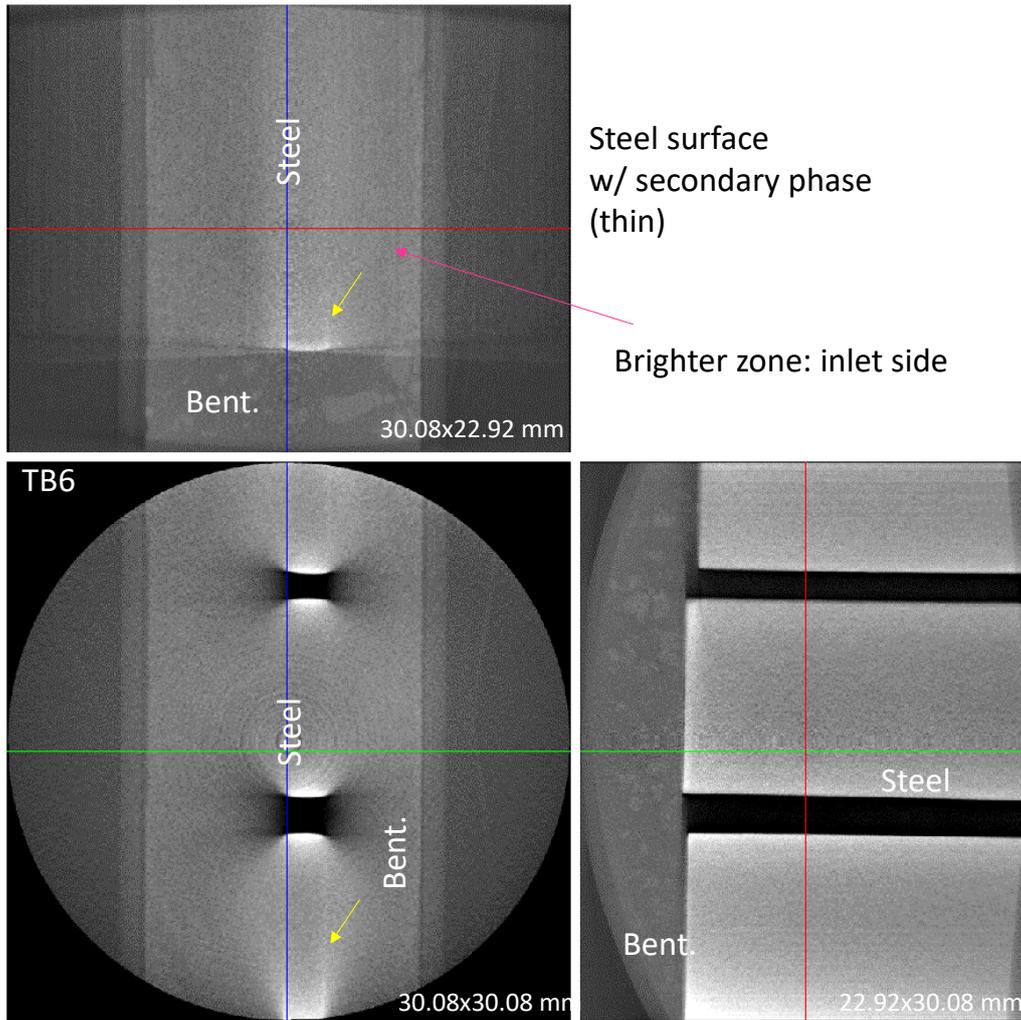


図 3.2.3-77 ベントナイト中の炭素鋼 AFW10-MB 試験片のナノ XCT 画像

(3) 長期浸漬試料（昨年度解体した試料・凍結保存）

1) 試料の回収と前処理

昨年度解体し、凍結保存されたベントナイトカラムから回収された炭素鋼片は開封して直ちに真空乾燥処理を行った。

EPMA のマッピング分析に供する炭素鋼試料は樹脂包埋して断面を露出するように研磨した。

2) FETEM-EDS

E621(ASW10)試料について、FETEM-EDS 観察を行った。粒子の産状と各視野における SAED を図 3.2.3-78 に示す。非常に微細な磁鉄鉱が含まれていると思われるが、視野全体では結晶質の粒子で構成されていることがわかる。SAED スポットはフェロシライトに帰属している。視野全体の EDS 分析結果は $Fe/Si > 1$ を示しており、磁鉄鉱+フェロシライトと考えても

矛盾はない。STEM 測定による元素分布からは FeSiO_3 組成を示しており、そこには S も含まれていることから、大部分はガラス質であると思われる。

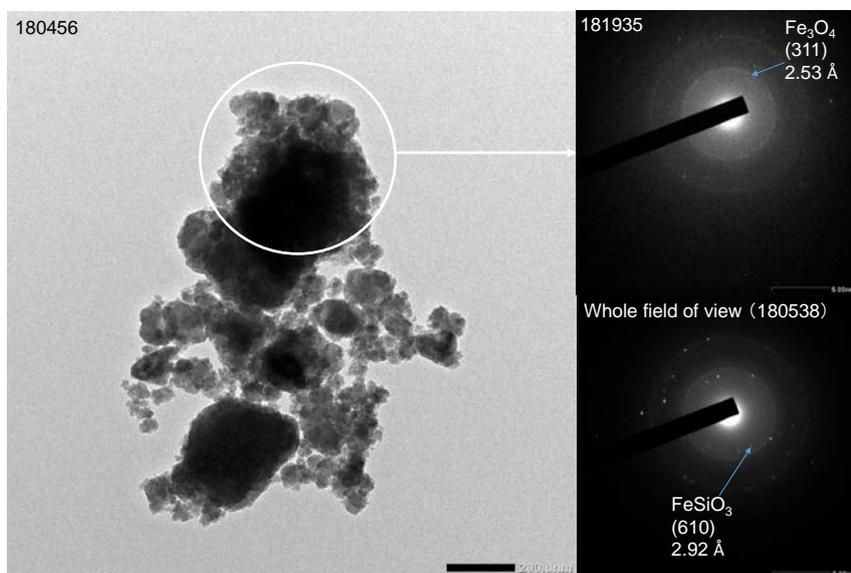


図 3.2.3-78 E621(ASW10)試料の TEM 観察

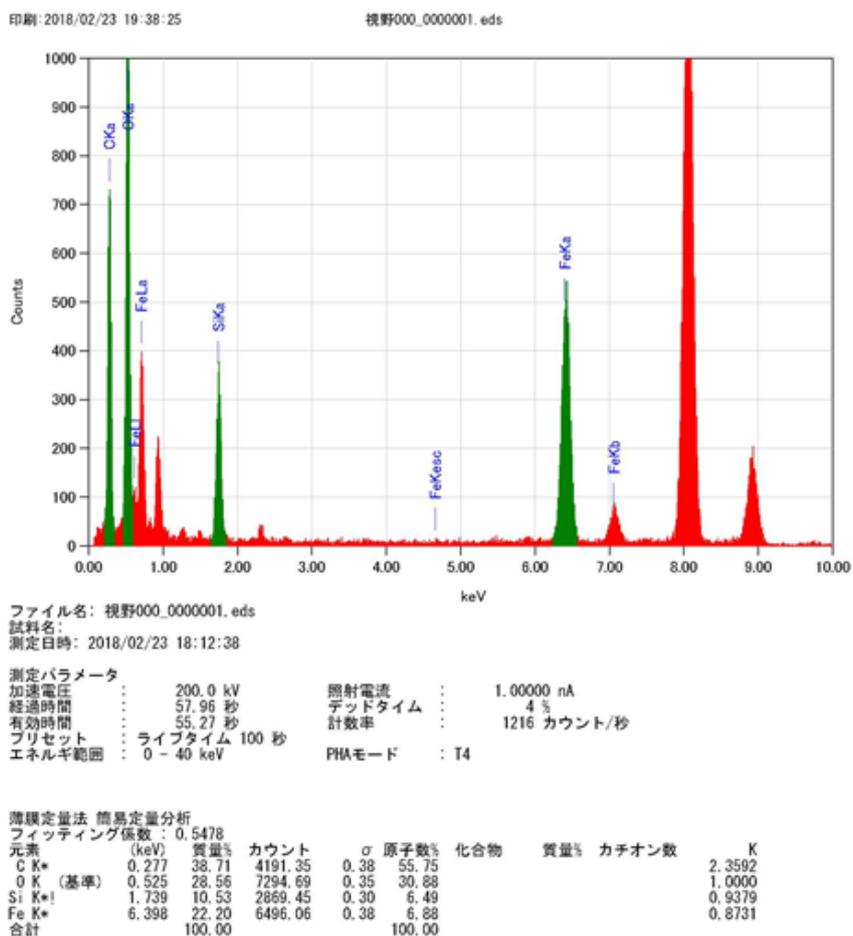


図 3.2.3-79 E621(ASW10)試料の EDS 測定

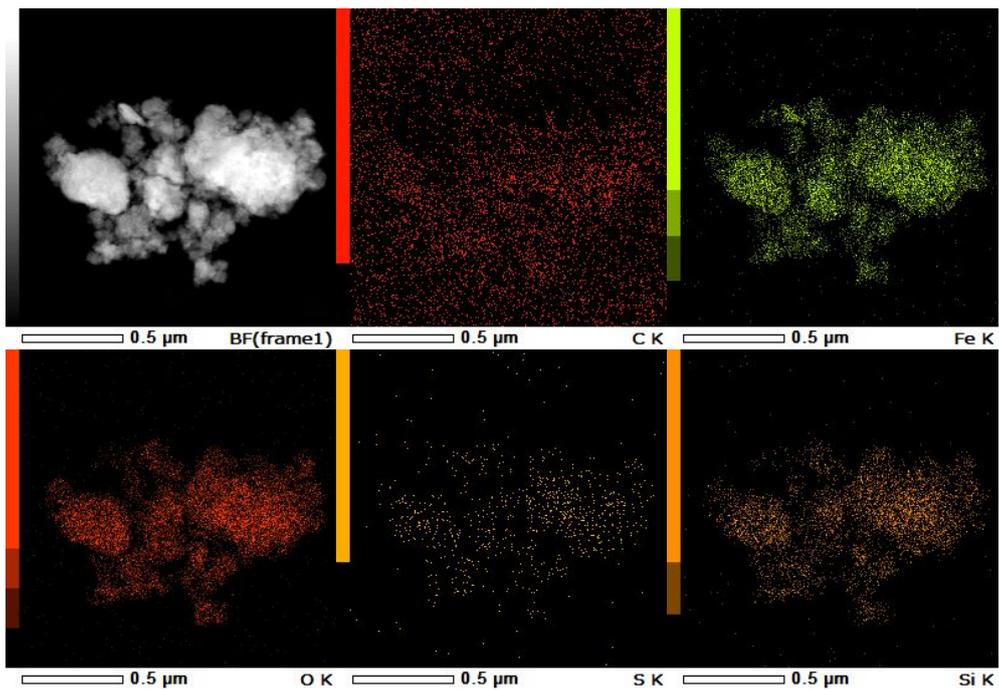


図 3.2.3-80 E621(ASW10)試料の STEM 測定

3) EPMA

a マッピング分析

露出研磨させた試料についてマッピング分析した。その結果を図 3.2.3-81 から図 3.2.3-88 に示す。

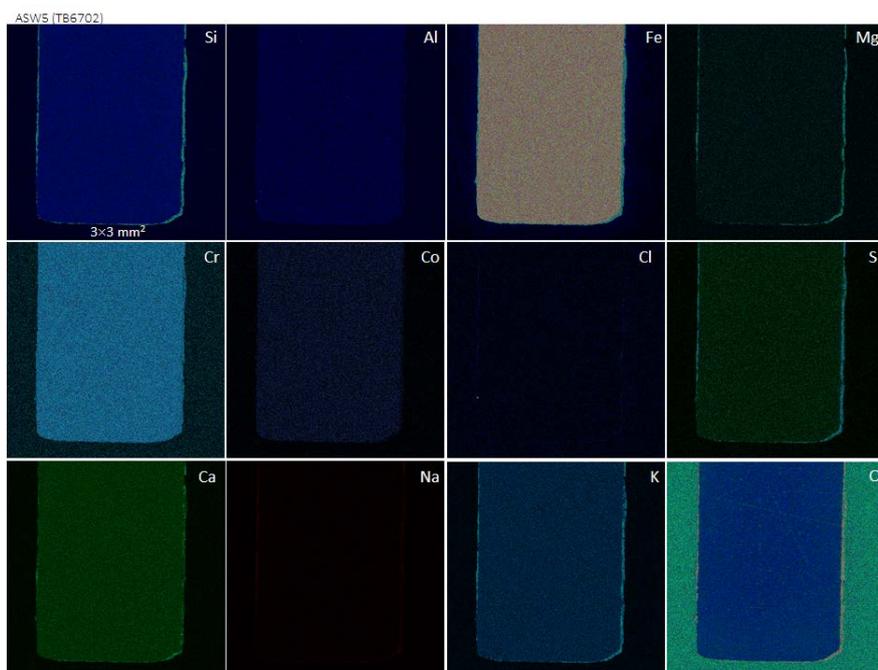


図 3.2.3-81 ASW5(TB6702)炭素鋼試料の腐食断面の元素マッピング

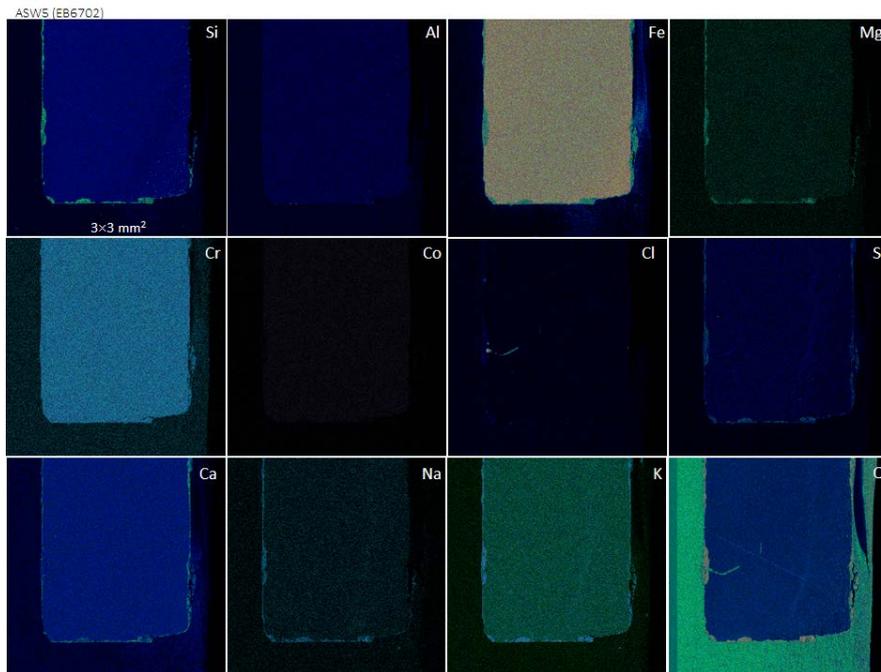


図 3.2.3-82 ASW5(EB6702)炭素鋼試料の腐食断面の元素マッピング

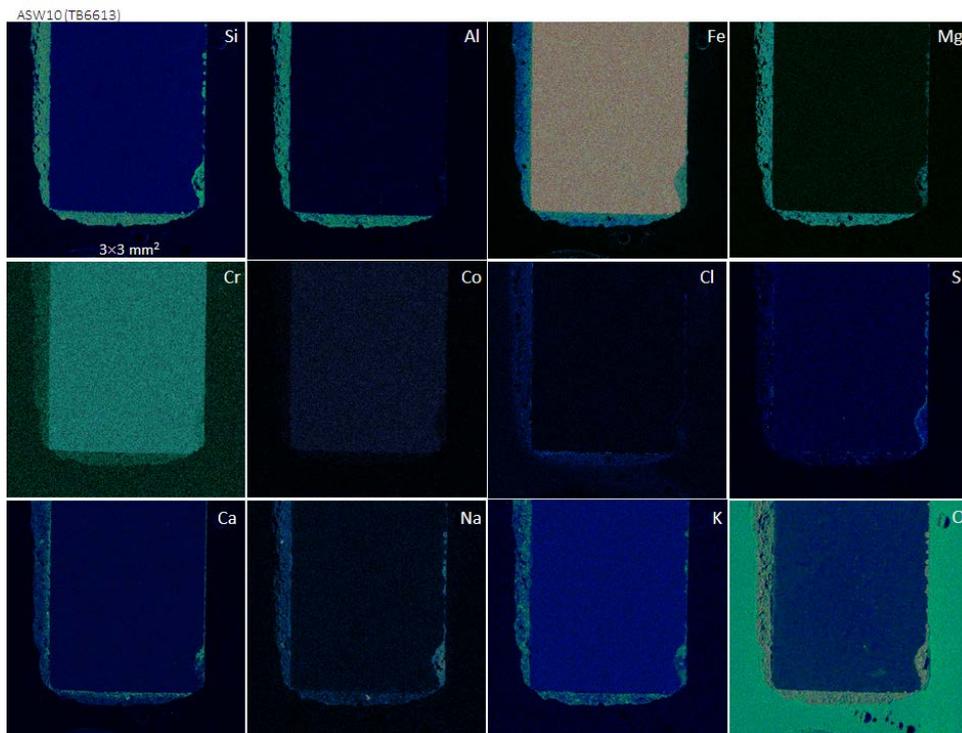


図 3.2.3-83 ASW10(TB6613)炭素鋼試料の腐食断面の元素マッピング

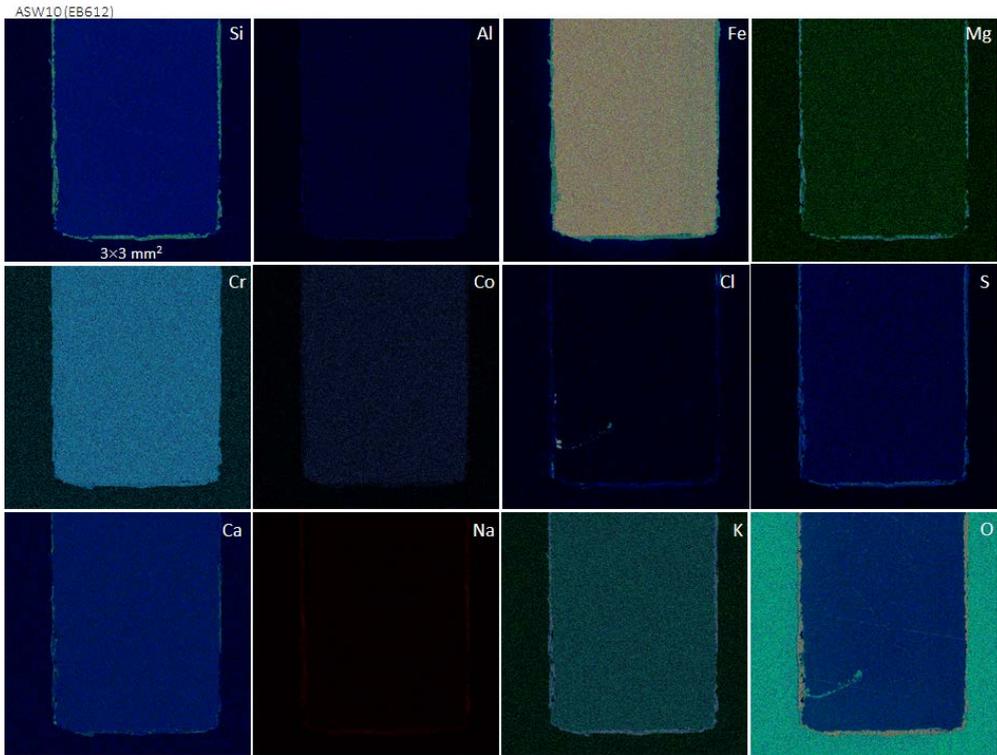


図 3.2.3-84 ASW10(EB612)炭素鋼試料の腐食断面の元素マッピング

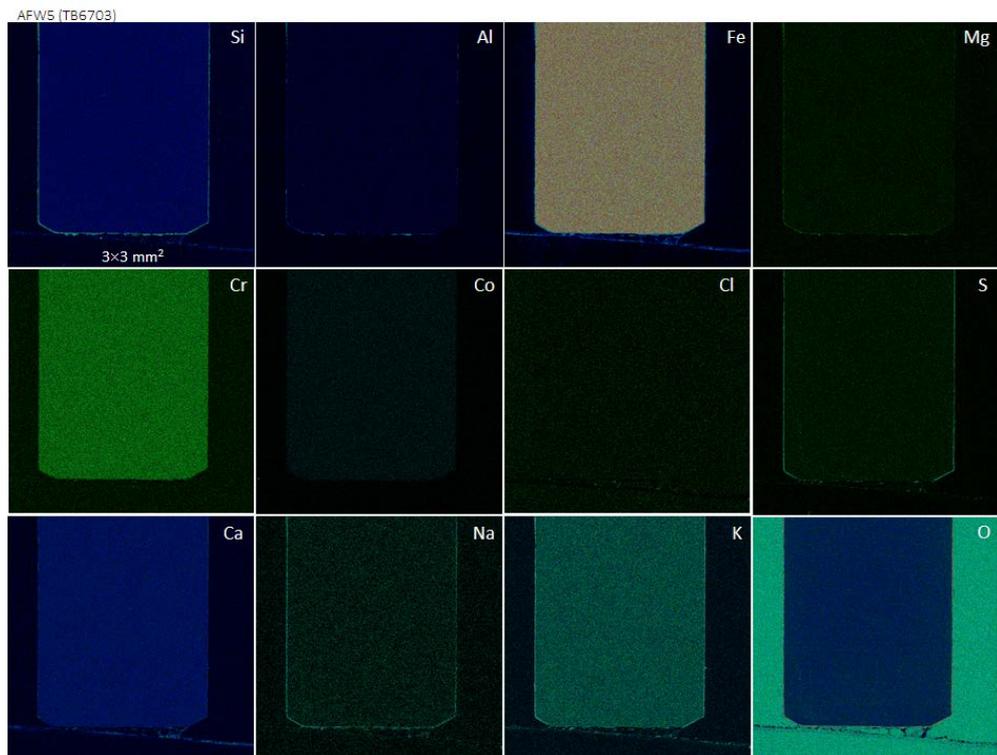


図 3.2.3-85 AFW5(TB6703)炭素鋼試料の腐食断面の元素マッピング

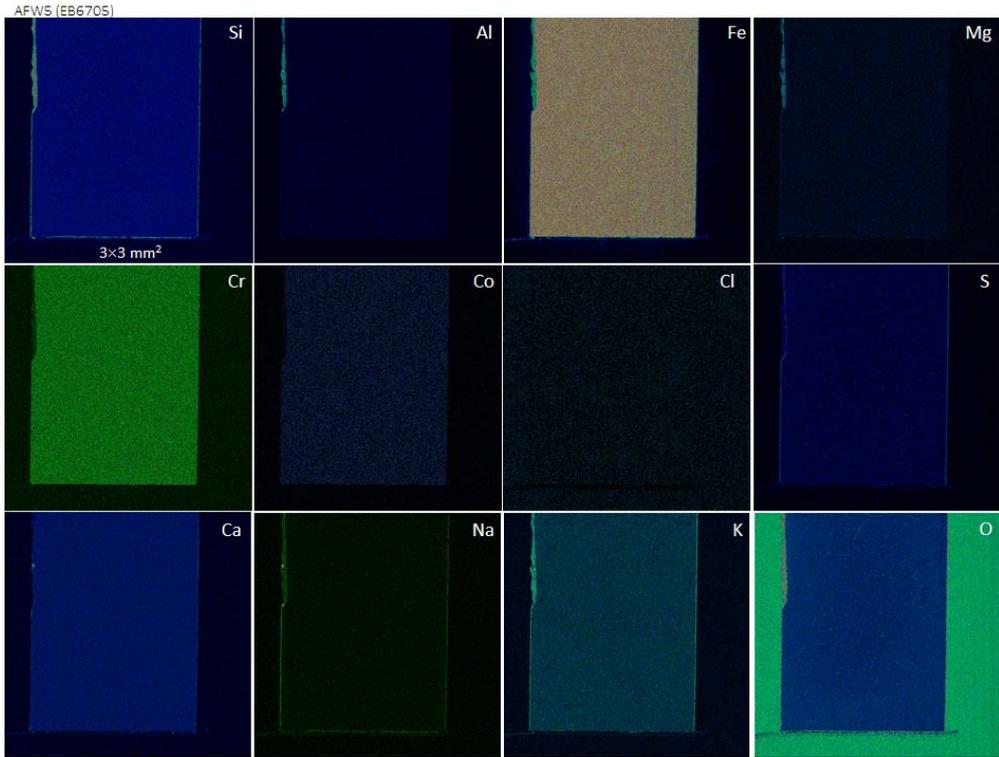


図 3.2.3-86 AFW5(EB6705)炭素鋼試料の腐食断面の元素マッピング

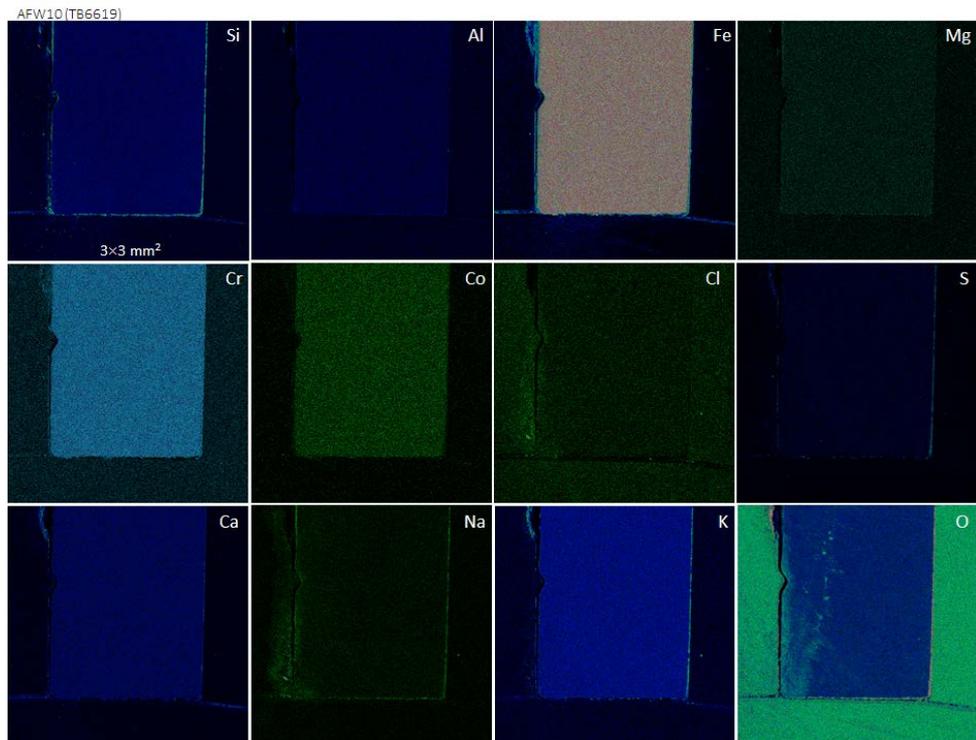


図 3.2.3-87 AFW10(TB6619)炭素鋼試料の腐食断面の元素マッピング

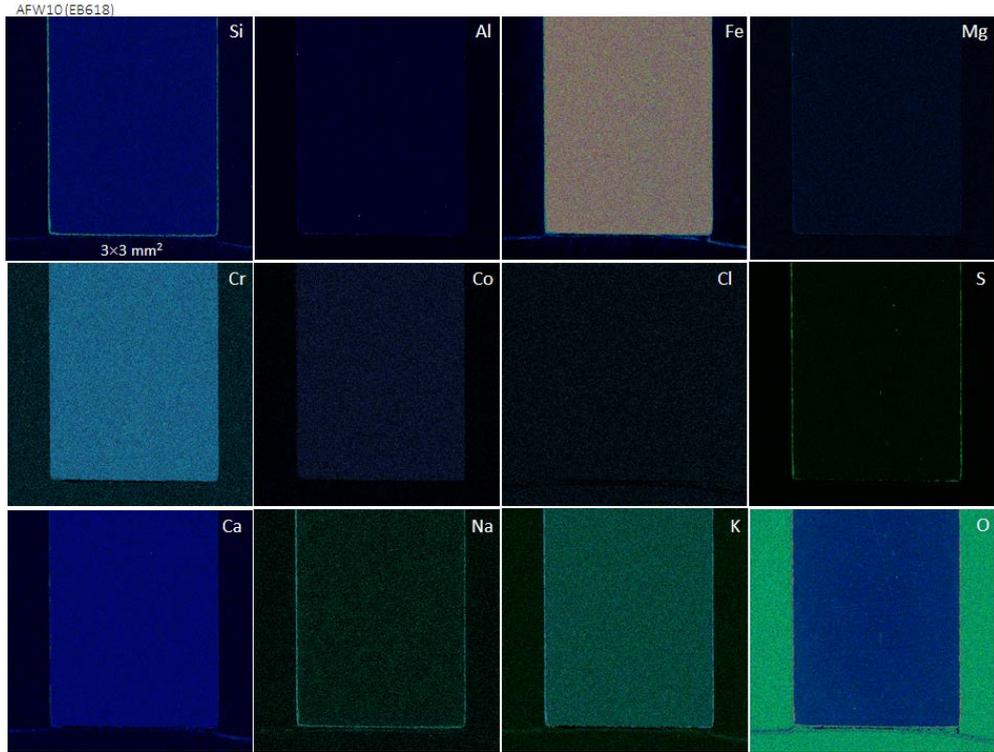


図 3.2.3-88 AFW10(EB618)炭素鋼試料の腐食断面の元素マッピング

これらのうち、海水系炭素鋼試料は常に界面の腐食層が淡水系よりも発達していることがわかる。図 3.2.3-89 と図 3.2.3-90 には海水系試料の 5, 10 年試験において O と S について抜粋したものをそれぞれ示した。

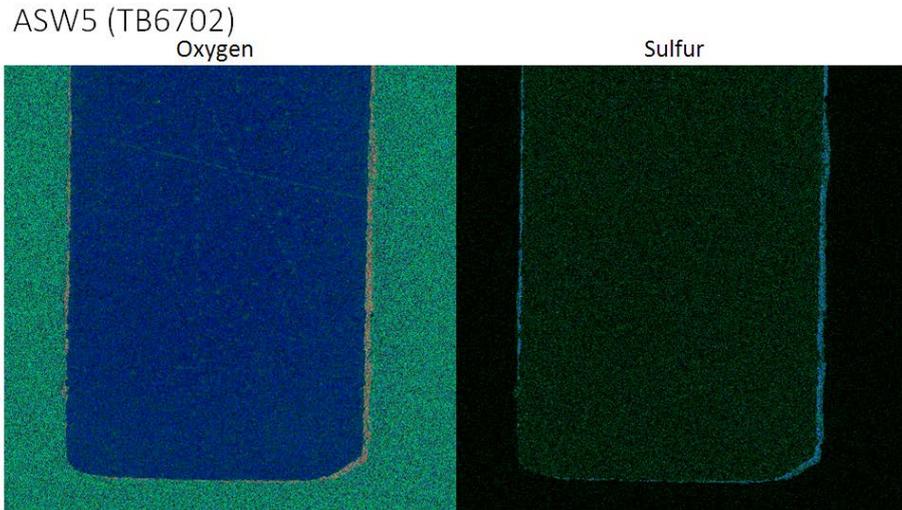


図 3.2.3-89 ASW5_TB6702 試料の EPMA マッピング観察(O and S)

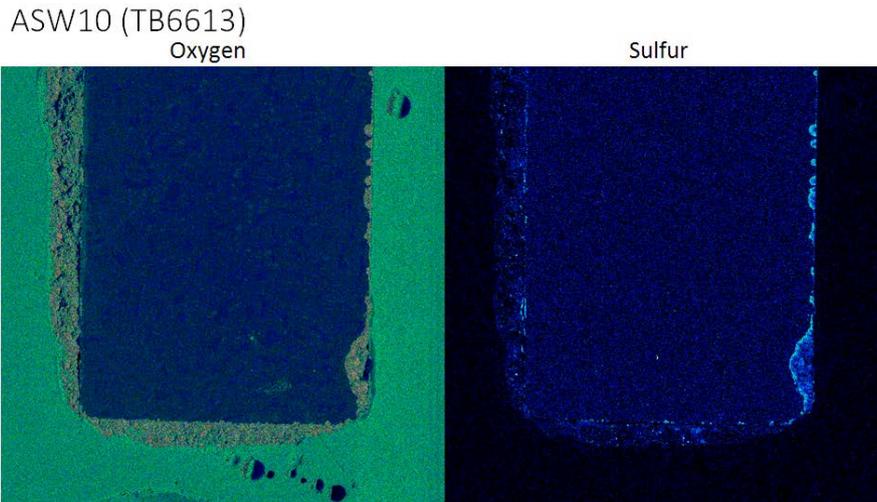


図 3.2.3-90 ASW10_TB6613 試料の EPMA マッピング観察(O and S)

炭素鋼界面には、海水系反応試料でケイ酸塩を伴う鉄酸化物被膜が比較的厚く発達しており、詳細な観察の結果、鉄酸化被膜は、酸化鉄とその上に生成した S, Cl を含む非晶質（ガラス）被膜とそこから成長した微細な金属鉄を伴う Fe-Na ケイ酸塩結晶で構成されていることが確認できた。この組織は一種のエナメル（琺瑯）被覆と同等のものであると解釈できる。

b 被覆層の詳細分析

さらに詳細な分析を TB6613(ASW10)と TB6619AFW10)炭素鋼において実施した。EPMA によるビームスキャン式マッピングデータを図 3.2.3-91 およびにそれぞれ示す。海水系の TB6613 炭素鋼の接するベントナイトとの境界にはケイ酸を含まない相があり Fe-O-Cl のシグナルから $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{-FeCl}_2$ の固溶体であると思われる。その外側には SiO_2 と Na, S のやや多い領域があり、Fe と Mn はやや乏しくなる。さらにその外側には Fe-Cl-Mn に富む領域があり、内部に不調和に Na が少なく不純物のない結晶と思われるドメインが複数ある。ファイヤライト(Fe_2SiO_4)などの結晶相と思われる。一方で、淡水系の TB6619 炭素鋼の接するベントナイトとの境界には酸化物、水酸化物層は無いが薄くて確認できないが、その外側のケイ酸塩層は海水系のそれよりも明らかに薄い（数十ミクロン）。Fe 以外には Na に富む傾向は海水系と同じであるが、Cl は含まず、より多くの S を溶解している。Na を含まない結晶相と思われる領域は確認できない。

さらに詳細な分析を同じ視野において行った。拡大した BEI を図 3.2.3-93 と図 3.2.3-94 に示す。非常に複雑な腐食界面が発達していることがわかったが、基本的には酸素とケイ素を含む、おそらく酸化物（水酸化物）とケイ酸塩の複合生成物で構成された被膜が腐食界面の本質であるのだろう。鉄の溶出は、この界面を経由して行われていると解釈することができる。

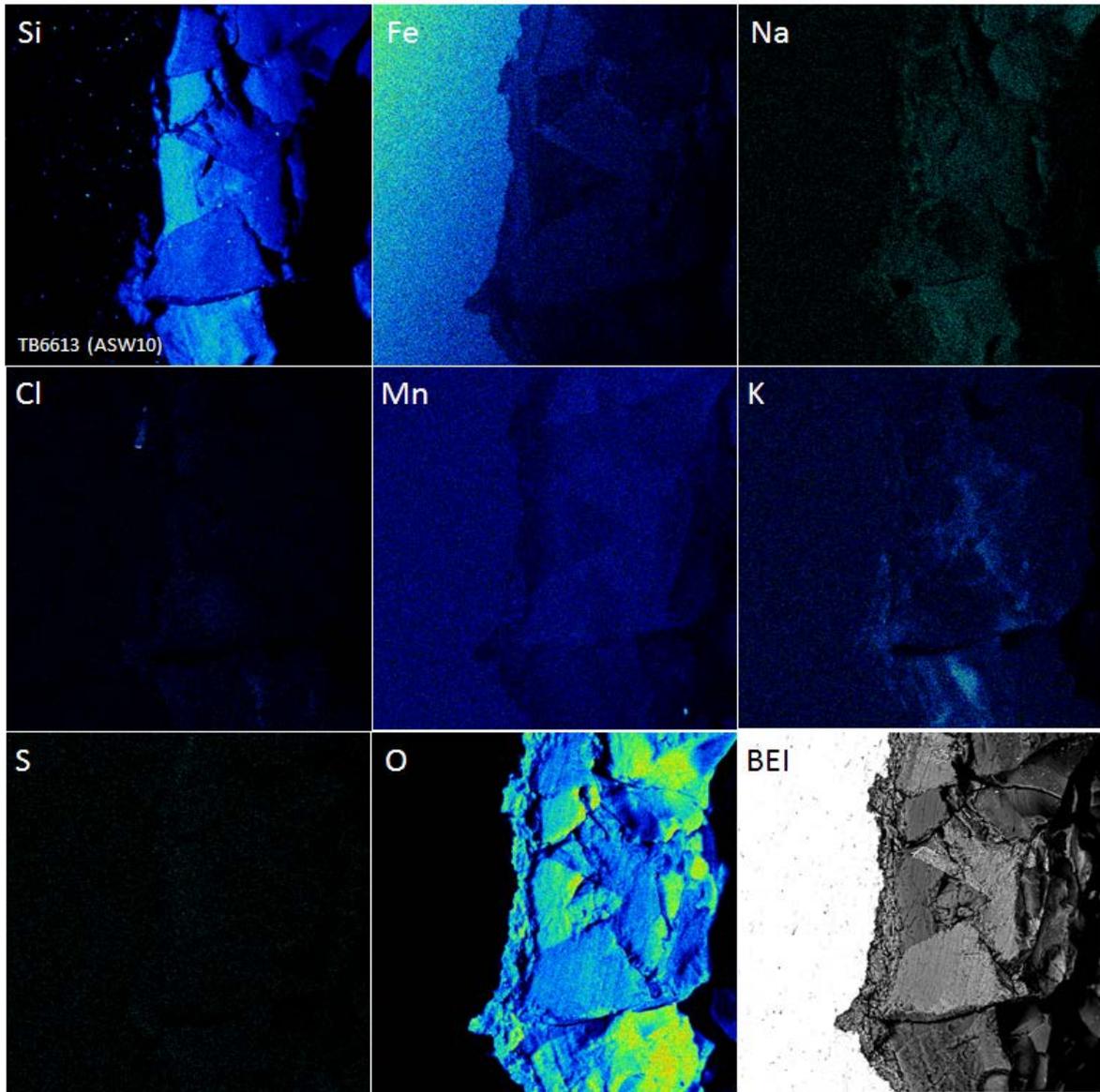


図 3.2.3-91 海水系浸漬試料の炭素鋼 TB6613(ASW10)の EPMA ビームスキャンマッピング
(視野は 200x200 μm^2)

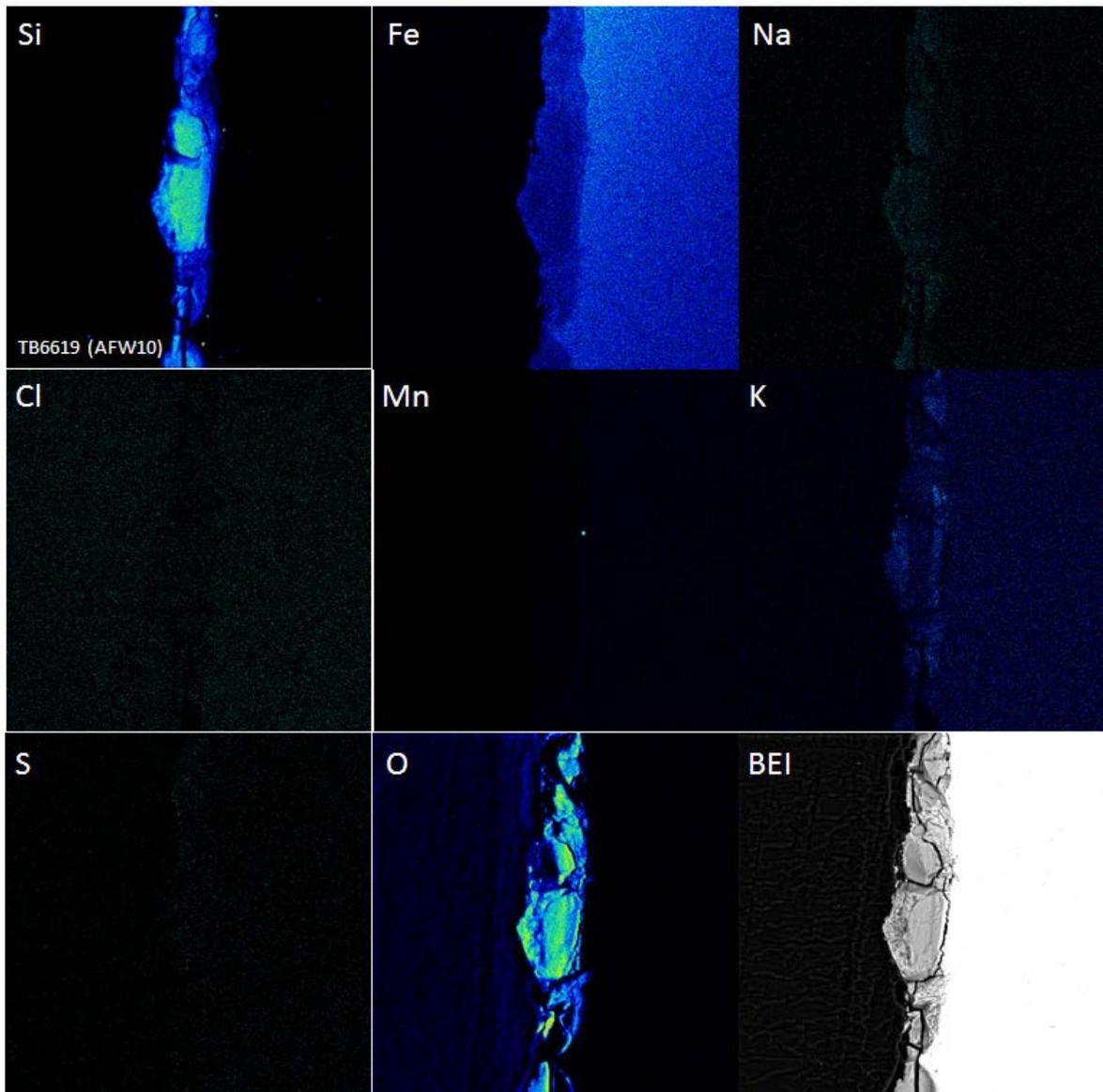


図 3.2.3-92 海水系浸漬試料の炭素鋼 EB618(AFW10)の EPMA ビームスキャンマッピング
(視野は 200x200 μm^2)

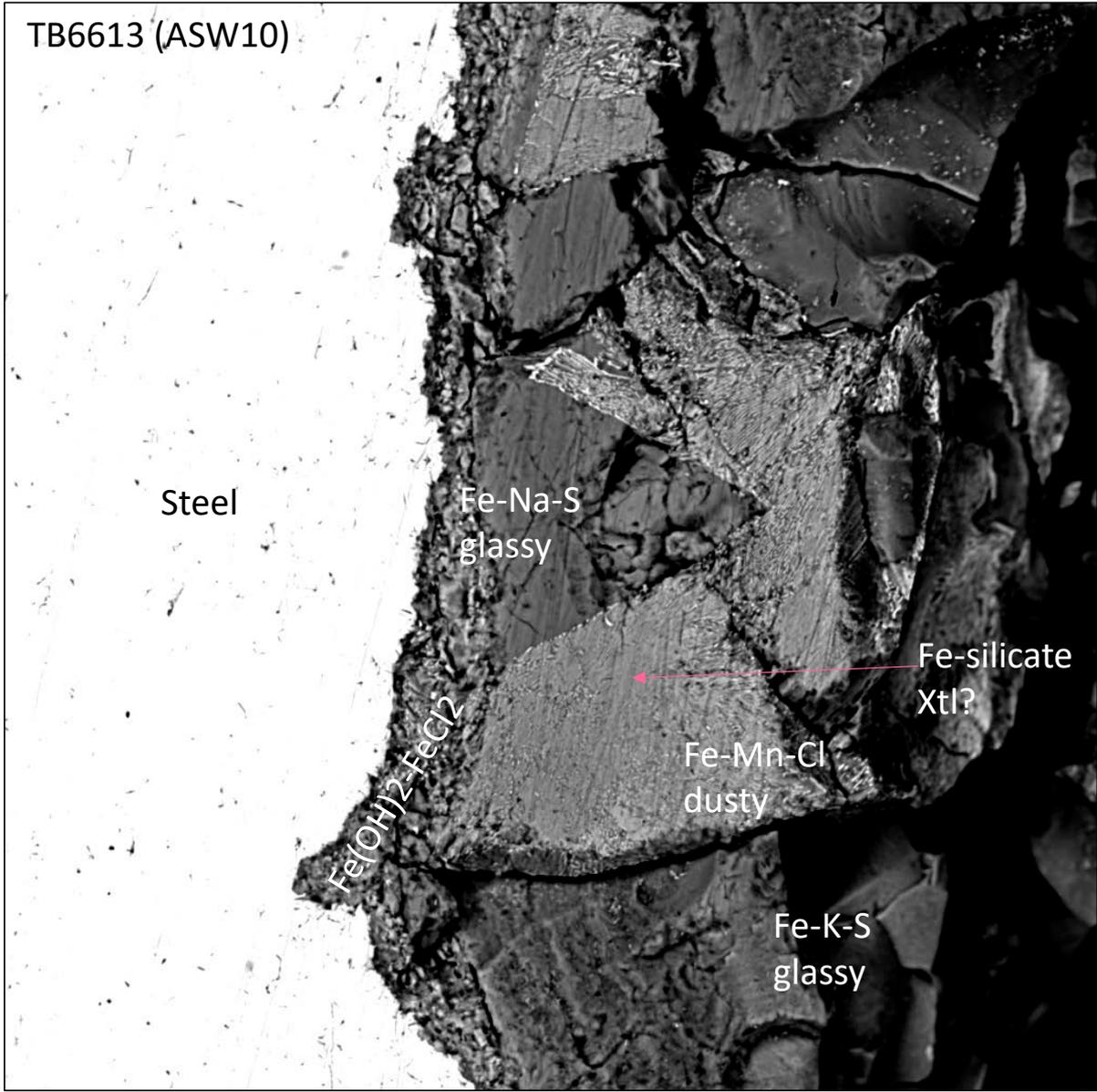


図 3.2.3-93 海水系の炭素鋼腐食界面のケイ酸塩層の微細組織(BEI, 200x200 μm^2)

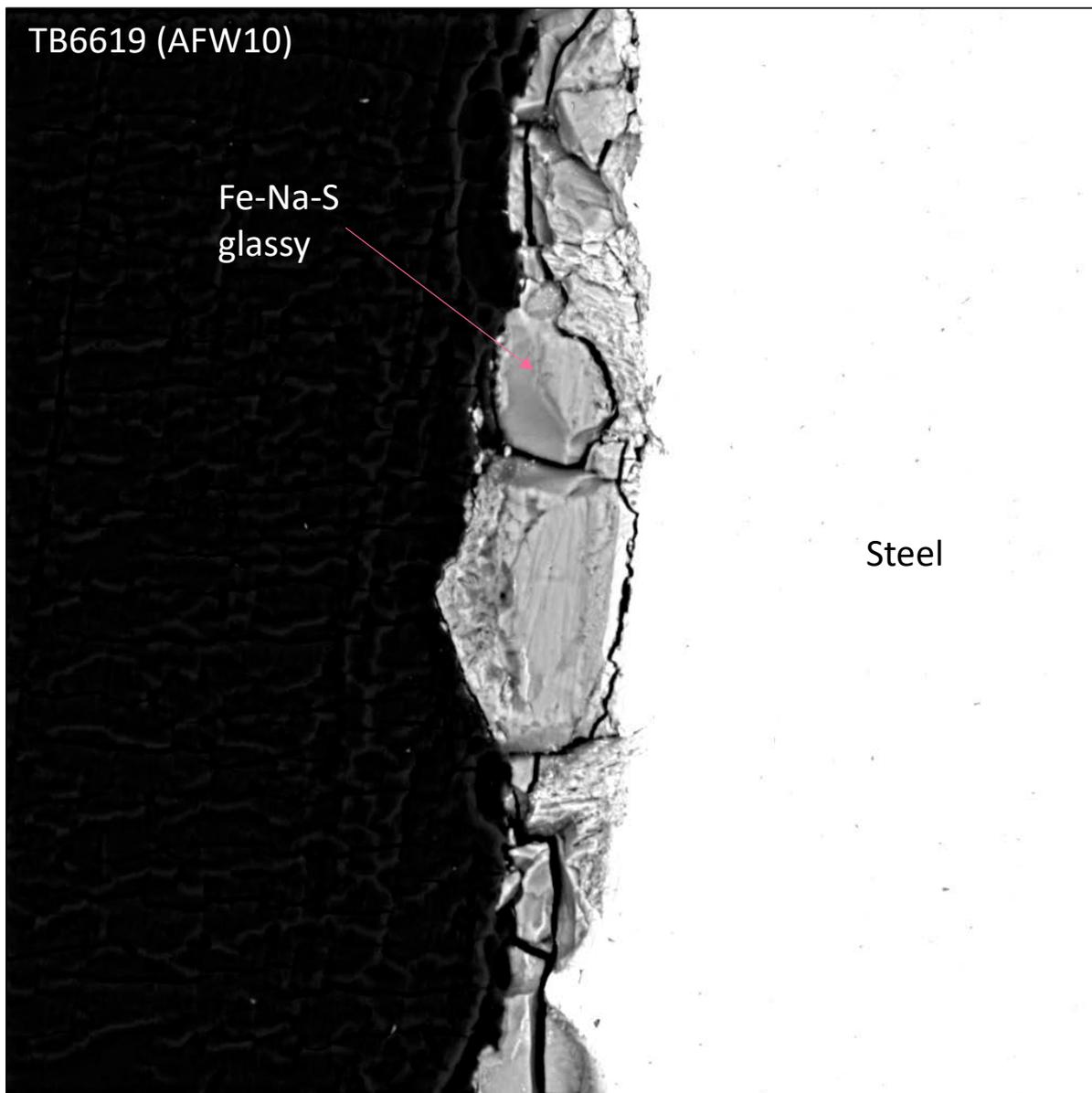


図 3.2.3-94 淡水系の炭素鋼腐食界面のケイ酸塩層の微細組織(BEI, 200x200 μm^2)

c 被覆層の化学組成

海水系および淡水系の炭素鋼界面の被覆（エナメル）層についてスポット分析を実施した。分析スポットについては図 3.2.3-95 と図 3.2.3-96 にそれぞれ示した。それらの分析結果について表 3.2.3-11 と表 3.2.3-12 にそれぞれ示す。炭素鋼エナメル層はフェロシライト、ファイヤライト組成の領域がほとんどであるが、微細な組織を示す金属生成物と思われる BEI では高輝度を示す析出物が影響しているのか、EPMA の分解能では正しい結晶組成とはならない。しかし、Na, S, Cl の含有量の多さから判断すると、これらのアルカリ、揮発性元素が輝石やオリビン結晶構造に取り込まれることは困難であるため、また EPMA 分析値のトータルの低さを考えると、やはり結晶ではなくこの領域はほとんど非晶質なガラス生成物と考えてよさそうである。しかしその組成はファイヤライトからフェロシライト質の Fe ケイ酸塩質であることから、これらの結晶が特に前者については析出する可能性が大きいだろう。詳細は TEM 観察で検証したい。

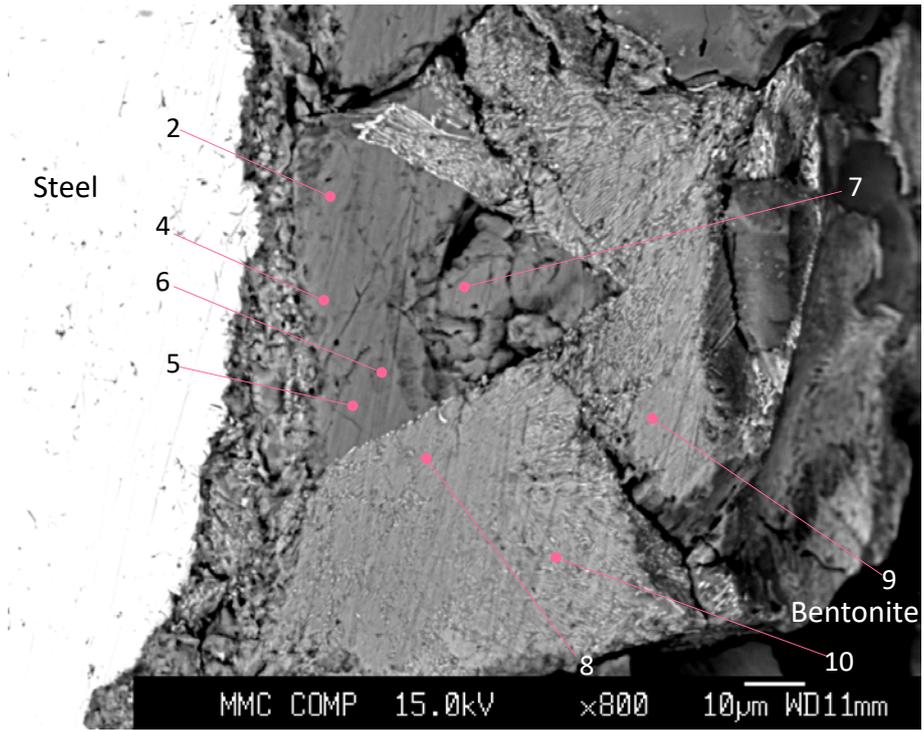


図 3.2.3-95 海水系炭素鋼の被覆層のスポット分析

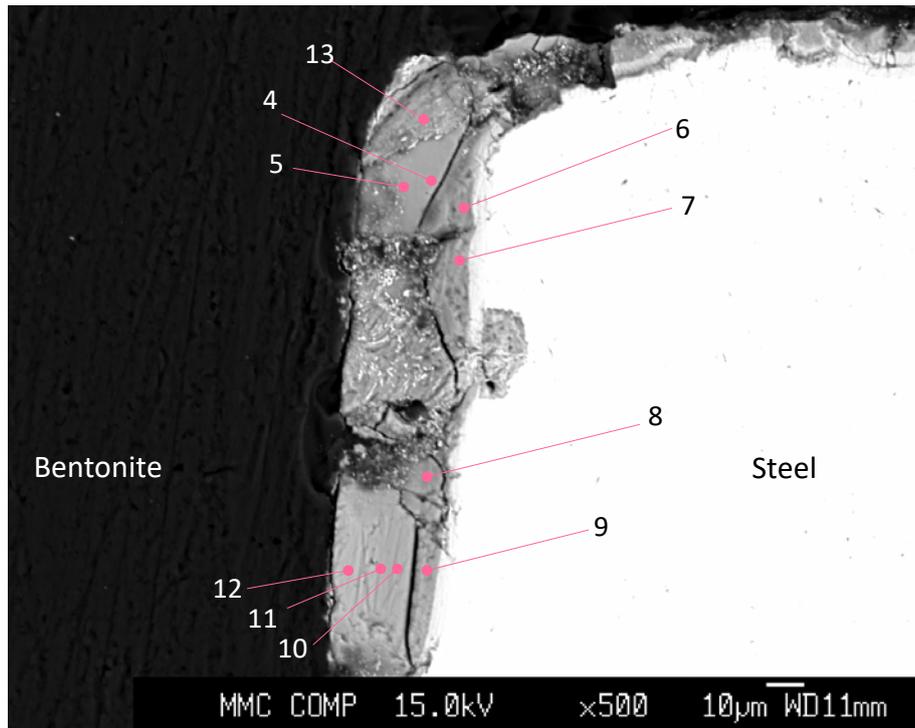


図 3.2.3-96 淡水系炭素鋼の被覆層のスポット分析

表 3.2.3-11 海水系炭素鋼の被覆層の化学組成

Sample ID	E_ASW10							
	TB6613							
Spot No.	2	4	5	6	7	8	9	10
Phase	Glassy							
SiO2	29.41	27.78	30.68	30.49	21.77	19.59	14.74	18.73
Al2O3	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00
TiO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	48.96	48.56	48.37	47.76	57.56	65.88	72.34	69.93
Cr2O3	0.12	0.12	0.14	0.12	0.15	0.10	0.13	0.15
NiO	0.01	0.00	0.16	0.07	0.04	0.03	0.00	0.07
MnO	0.48	0.40	0.54	0.75	0.59	0.89	0.99	0.63
MgO	0.29	0.18	0.24	0.38	0.45	0.21	0.29	0.22
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na2O	0.22	0.77	0.06	1.05	0.82	0.13	0.49	0.32
K2O	0.00	0.03	0.00	0.06	0.10	0.00	0.00	0.00
S	3.71	3.34	2.85	2.40	1.01	0.84	1.02	1.13
Cl	9.66	6.18	6.68	3.92	5.79	10.56	2.27	8.96
-O	3.11	2.23	2.22	1.48	1.56	2.59	0.77	2.30
Total	89.76	85.13	87.54	85.53	86.71	95.64	91.51	97.84
Aroms per formula unit								
O	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Si	0.947	0.971	1.025	1.065	0.825	0.681	0.604	0.653
Al	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	1.318	1.420	1.352	1.395	1.823	1.915	2.478	2.040
Cr	0.003	0.003	0.004	0.003	0.005	0.003	0.004	0.004
Ni	0.000	0.000	0.004	0.002	0.001	0.001	0.000	0.002
Mn	0.013	0.012	0.015	0.022	0.019	0.026	0.034	0.019
Mg	0.014	0.010	0.012	0.020	0.025	0.011	0.017	0.011
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.014	0.052	0.004	0.071	0.060	0.009	0.039	0.022
K	0.000	0.002	0.000	0.003	0.005	0.000	0.000	0.000
S	0.224	0.219	0.179	0.157	0.072	0.055	0.079	0.074
Cl	0.527	0.366	0.379	0.232	0.372	0.622	0.158	0.530
Total	3.059	3.054	2.975	2.970	3.206	3.322	3.414	3.355

表 3.2.3-12 淡水系炭素鋼の被覆層の化学組成

Sample ID	C_AFW10 _TB6619_ 4	C_AFW10 _TB6619_ 5	C_AFW10 _TB6619_ 6	C_AFW10 _TB6619_ 7	C_AFW10 _TB6619_ 8	C_AFW10 _TB6619_ 9	C_AFW10 _TB6619_ 10	C_AFW10 _TB6619_ 11	C_AFW10 _TB6619_ 12	C_AFW10 _TB6619_ 13
Spot No.	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Phase	Glassy	Glassy	Glassy	Glassy						
SiO ₂	37.47	36.37	35.77	24.59	25.95	34.15	34.55	32.48	27.23	29.33
Al ₂ O ₃	0.00	0.06	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.36	0.51
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
FeO	44.77	47.90	43.01	48.50	36.69	46.10	46.30	46.87	53.33	45.90
Cr ₂ O ₃	0.23	0.20	0.17	0.10	0.16	0.18	0.20	0.15	0.18	0.19
NiO	0.00	0.06	0.07	0.02	0.09	0.11	0.00	0.04	0.06	0.02
MnO	0.21	0.21	0.18	0.16	0.21	0.22	0.27	0.25	0.32	0.41
MgO	0.08	0.09	0.11	0.04	0.04	0.08	0.09	0.07	0.08	0.12
CaO	0.04	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.23
Na ₂ O	0.21	0.15	0.16	0.20	0.20	0.05	0.13	0.15	0.23	0.64
K ₂ O	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00
S	2.58	3.88	1.82	1.48	1.41	1.93	2.62	2.87	2.04	1.88
Cl	0.22	0.00	0.23	0.00	0.00	0.25	0.45	0.09	0.08	0.14
-O	0.69	0.97	0.51	0.37	0.35	0.54	0.76	0.74	0.53	0.50
Total	85.12	88.00	81.11	74.73	64.39	82.56	83.86	82.25	83.40	78.87
Aroms per formula unit										
O	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Si	1.266	1.203	1.276	1.057	1.208	1.224	1.210	1.177	1.042	1.135
Al	0.000	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016	0.023
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	1.265	1.325	1.283	1.743	1.429	1.382	1.356	1.421	1.707	1.486
Cr	0.006	0.005	0.005	0.004	0.006	0.005	0.006	0.004	0.005	0.006
Ni	0.000	0.002	0.002	0.001	0.004	0.003	0.000	0.001	0.002	0.001
Mn	0.006	0.006	0.006	0.006	0.008	0.007	0.008	0.008	0.010	0.014
Mg	0.004	0.004	0.006	0.003	0.003	0.004	0.005	0.004	0.005	0.007
Ca	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.010
Na	0.014	0.010	0.011	0.016	0.018	0.004	0.009	0.010	0.017	0.048
K	0.000	0.001	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
S	0.163	0.240	0.122	0.119	0.123	0.130	0.172	0.195	0.146	0.137
Cl	0.013	0.000	0.014	0.000	0.000	0.015	0.027	0.006	0.005	0.009
Total	2.738	2.799	2.728	2.949	2.798	2.775	2.792	2.826	2.956	2.874

4) FESEM-EDS

昨年度回収された試料のうち、短時間の変質状態を確認するために、海水系浸漬 5 年間の炭素鋼試料(ASW5_E605)において炭素鋼表面をスクレイプして、できるだけその破片の断面が見える状態で試料調整し FESEM-EDS 観察を行った。結果を以下に列記する。

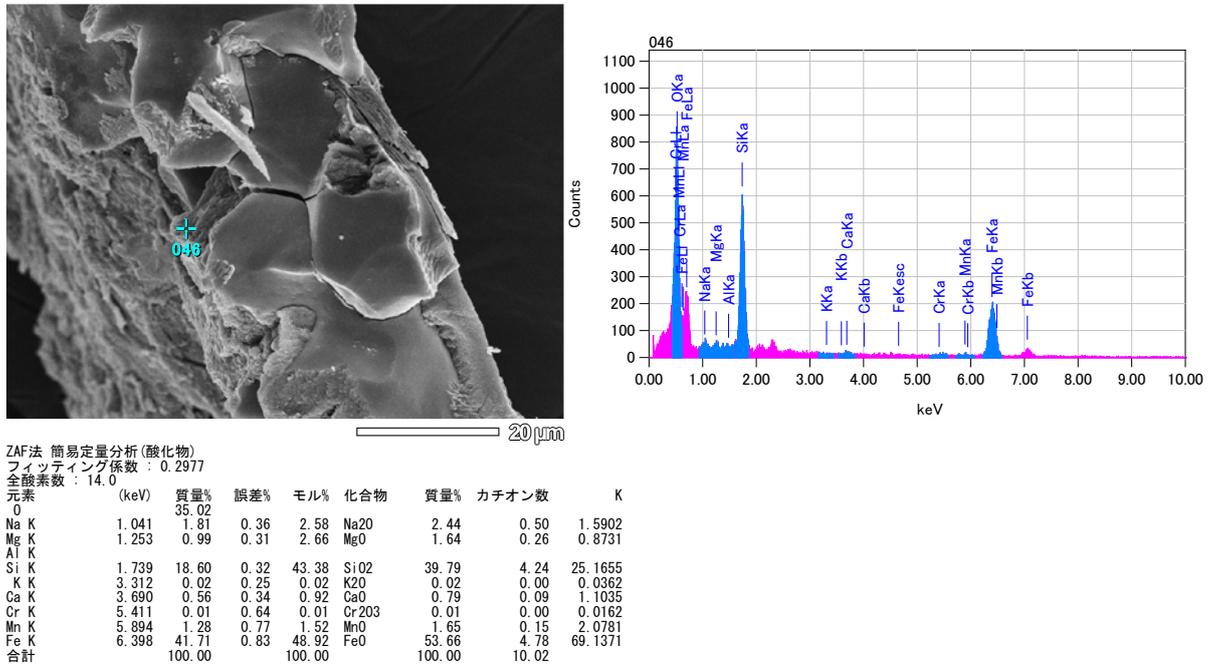


図 3.2.3-97 ASW5_E605 試料の界面スクレイプ試料(greenalite)

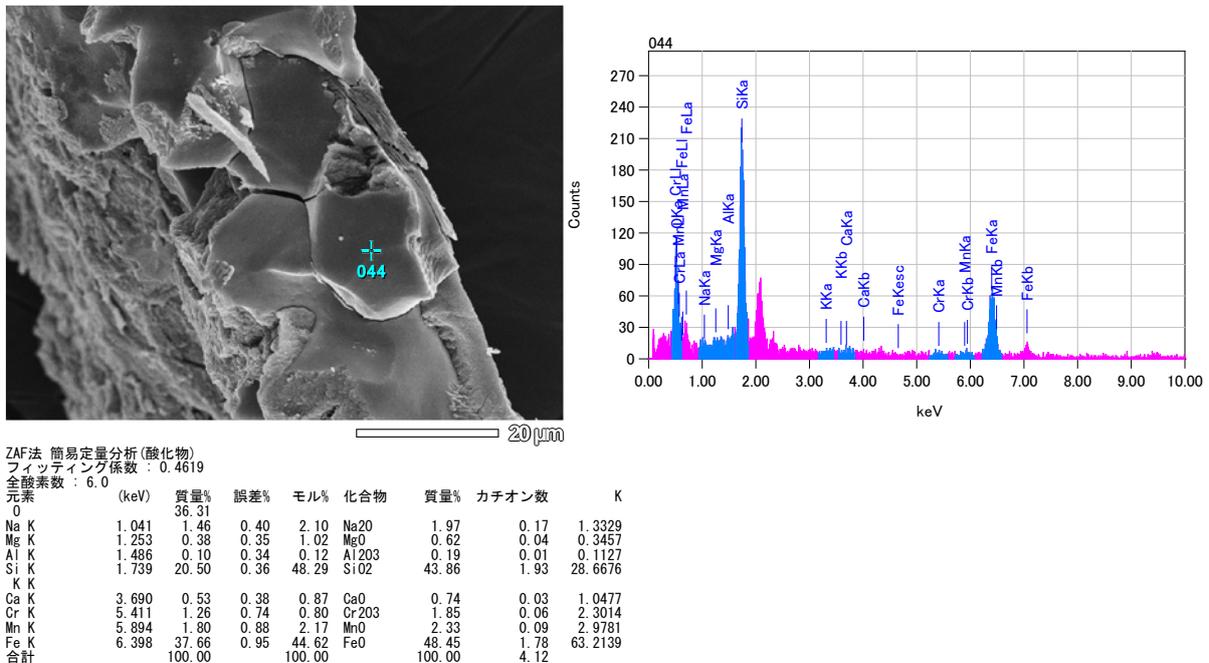
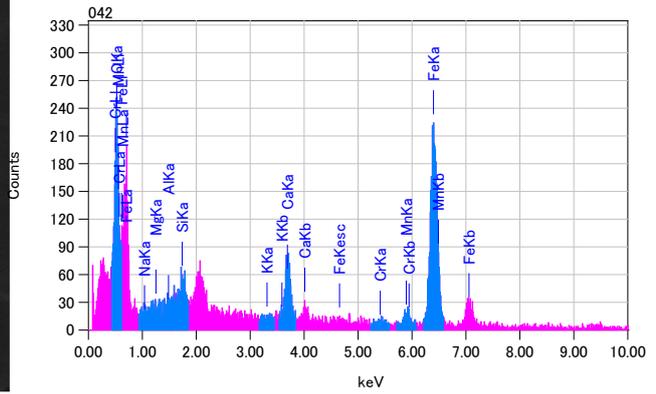
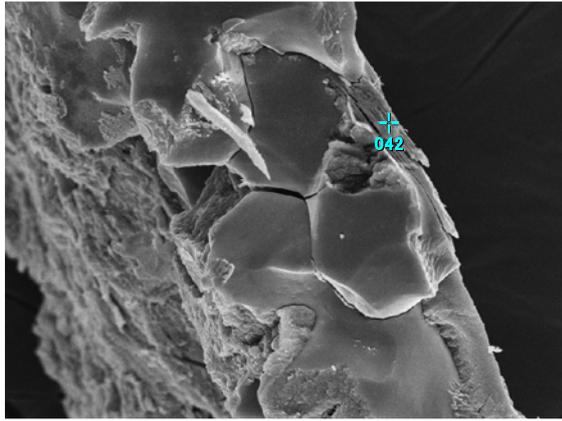


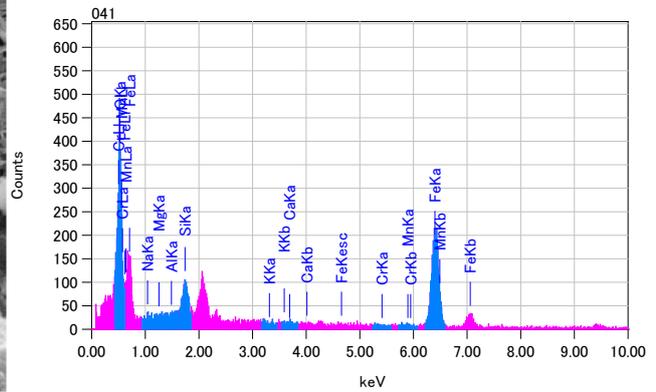
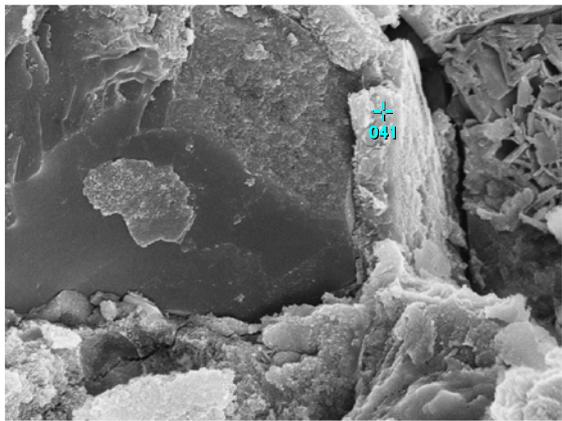
図 3.2.3-98 ASW5_E605 試料の界面スクレイプ試料(ferrosilite)



ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数 : 0.3823

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	20.89	0.13	46.65				25.5286
Na	1.041	0.45	0.24	0.71				0.1798
Mg								
Al								
Si	1.739	1.21	0.12	1.53				0.8195
K								
Ca	3.690	5.89	0.17	5.25				6.6260
Cr	5.411	0.80	0.31	0.55				0.8442
Mn	5.894	4.73	0.43	3.07				4.3397
Fe	6.398	66.02	0.47	42.23				61.6622
合計		100.00		100.00				

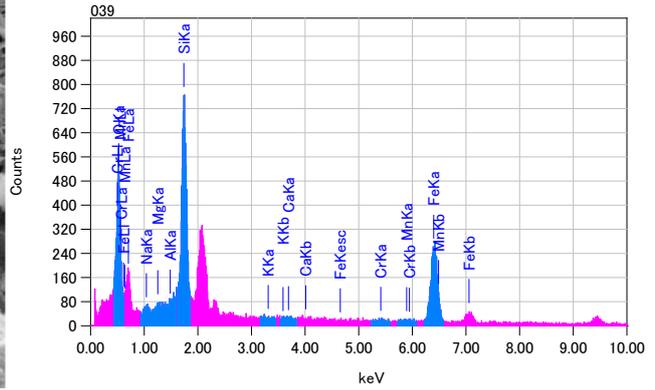
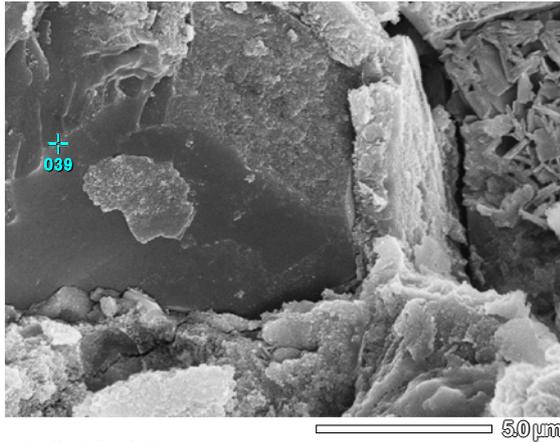
図 3.2.3-99 ASW5_E605 試料の界面スケレイブ試料(wustite)



ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数 : 0.4085

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	30.36	0.14	58.65				41.9611
Na	1.041	1.04	0.34	1.40				0.3822
Mg	1.253	0.11	0.23	0.14				0.0420
Al	1.486	0.19	0.19	0.22				0.0953
Si	1.739	3.15	0.17	3.47				1.9727
K								
Ca	3.690	0.32	0.25	0.24				0.3221
Cr								
Mn	5.894	1.22	0.61	0.69				1.0214
Fe	6.398	63.61	0.66	35.20				54.2033
合計		100.00		100.00				

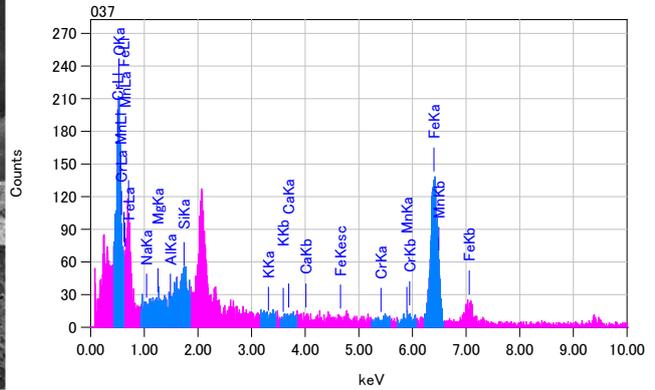
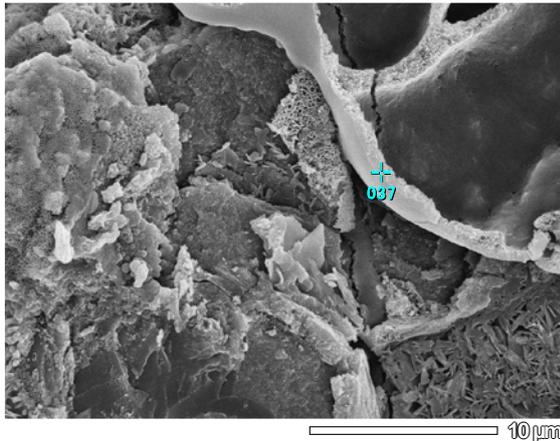
図 3.2.3-100 ASW5_E605 試料の界面スケレイブ試料(Fe(OH)₂)



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数 : 0.4050
 全酸素数 : 6.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		34.43						
Na K	1.041	1.34	0.45	1.93	Na2O	1.80	0.16	1.1262
Mg K	1.253	0.46	0.38	1.25	MgO	0.76	0.05	0.3909
Al K	1.486	0.15	0.37	0.19	Al2O3	0.29	0.02	0.1626
Si K	1.739	17.83	0.39	42.19	SiO2	38.14	1.77	23.5555
Ca K	3.690	0.26	0.41	0.44	CaO	0.37	0.02	0.5093
Cr K	5.411	0.37	0.77	0.23	Cr2O3	0.54	0.02	0.6584
Mn K	5.894	1.20	0.93	1.45	MnO	1.55	0.06	1.9193
Fe K	6.398	43.97	1.00	52.32	FeO	56.56	2.19	71.6778
合計		100.00		100.00		100.00	4.29	

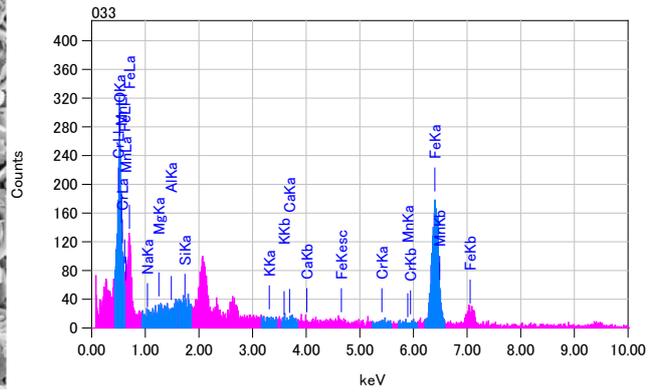
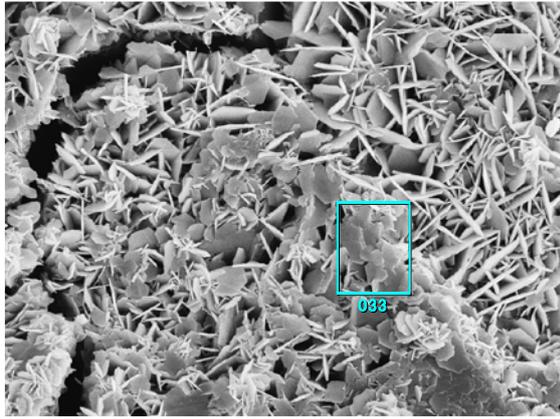
図 3.2.3-101 ASW5_E605 試料の界面スクレイプ試料(ferrosilite)



ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数 : 0.5156

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O K	0.525	23.68	0.25	50.99				33.3404
Na K								
Mg K	1.253	0.40	0.36	0.56				0.1536
Al K								
Si K	1.739	2.50	0.27	3.07				1.5909
Ca K								
Cr K	3.690	0.21	0.37	0.18				0.2236
Mn K	5.894	2.98	0.93	1.87				2.5940
Fe K	6.398	70.23	1.01	43.32				62.0975
合計		100.00		100.00				

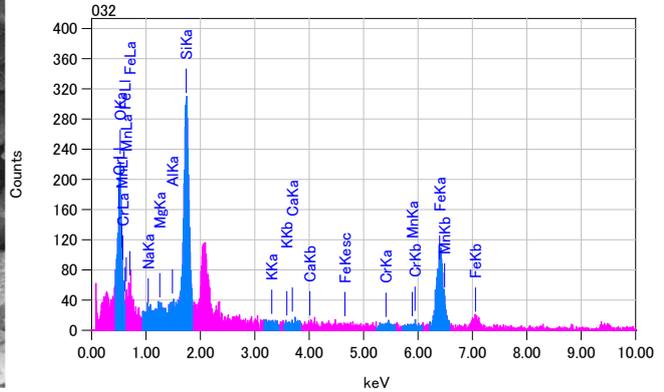
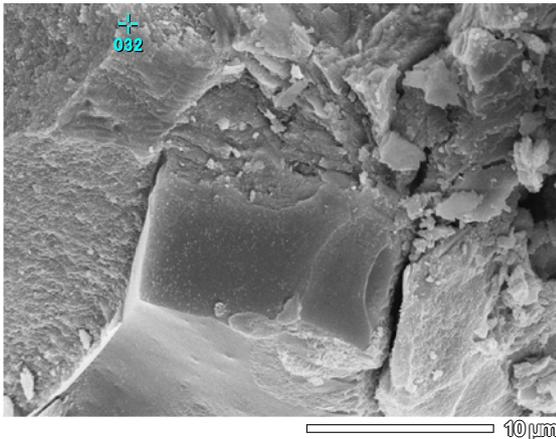
図 3.2.3-102 ASW5_E605 試料の界面スクレイプ試料(FeO)



ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数 : 0.4882

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	25.12	0.20	53.03				35.5511
Na	1.041	0.86	0.43	1.26				0.3089
Mg	1.253	0.90	0.29	1.25				0.3403
Al								
Si	1.739	0.19	0.21	0.22				0.1159
K	3.312	0.11	0.26	0.10				0.1078
Ca	3.690	0.26	0.30	0.22				0.2728
Cr	5.411	0.61	0.51	0.39				0.6208
Mn	5.894	0.90	0.74	0.55				0.7706
Fe	6.398	71.06	0.80	42.98				61.9119
合計		100.00		100.00				

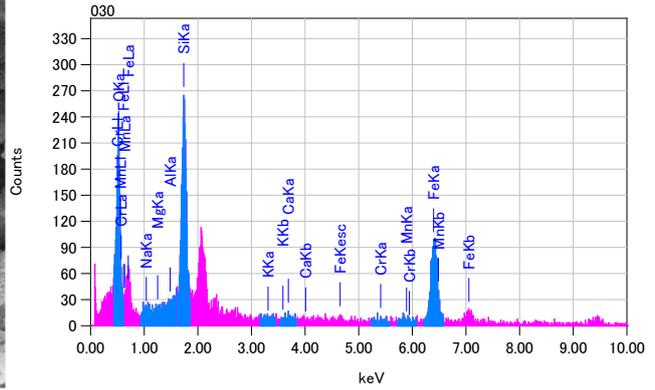
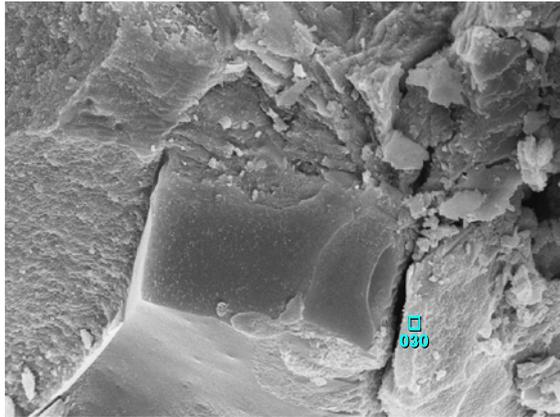
図 3.2.3-103 ASW5_E605 試料の界面スクレイプ試料(FeO)



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数 : 0.4492
 全酸素数 : 14.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		34.90						
Na	1.041	1.56	0.47	2.25	Na2O	2.11	0.44	1.3595
Mg	1.253	0.95	0.40	2.57	MgO	1.57	0.25	0.8306
Al	1.486	0.23	0.40	0.28	Al2O3	0.44	0.05	0.2506
Si	1.739	18.29	0.41	43.01	SiO2	39.12	4.18	24.5847
K	3.312	0.09	0.32	0.07	K2O	0.11	0.01	0.1626
Ca								
Cr	5.411	0.39	0.82	0.25	Cr2O3	0.58	0.05	0.7180
Mn	5.894	0.85	0.99	1.02	MnO	1.09	0.10	1.3791
Fe	6.398	42.74	1.06	50.55	FeO	54.99	4.91	70.7148
合計		100.00		100.00		100.00	9.99	

図 3.2.3-104 ASW5_E605 試料の界面スクレイプ試料(greenalite)

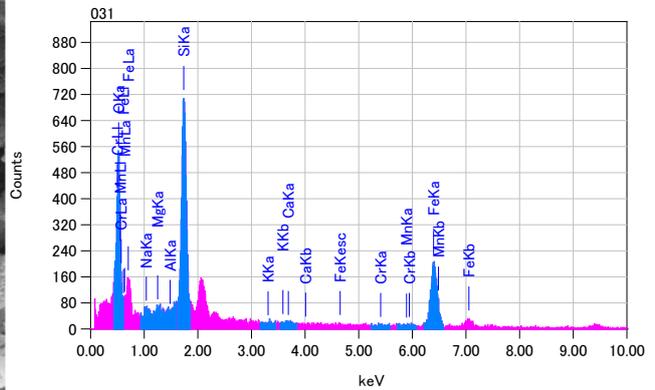
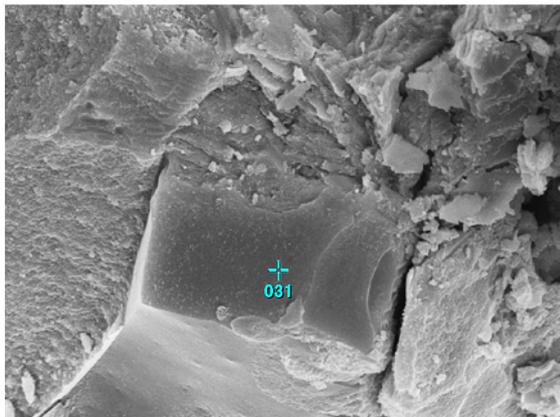


ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数 : 0.4685

全酸素数 : 14.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		33.88						
Na K	1.041	0.73	0.51	1.06	Na2O	0.99	0.21	0.6020
Mg K	1.253	0.64	0.43	1.75	MgO	1.06	0.17	0.5378
Al K	1.486	0.32	0.42	0.40	Al2O3	0.61	0.08	0.3357
Si K	1.739	16.92	0.44	40.08	SiO2	36.21	3.98	21.9167
K K								
Ca K	3.690	0.24	0.45	0.39	CaO	0.33	0.04	0.4519
Cr K								
Mn K	5.894	1.52	1.03	1.84	MnO	1.97	0.18	2.4159
Fe K	6.398	45.73	1.11	54.47	FeO	58.84	5.41	73.7400
合計		100.00		100.00		100.00	10.08	

図 3.2.3-105 ASW5_E605 試料の界面スクレイプ試料(greenalite)

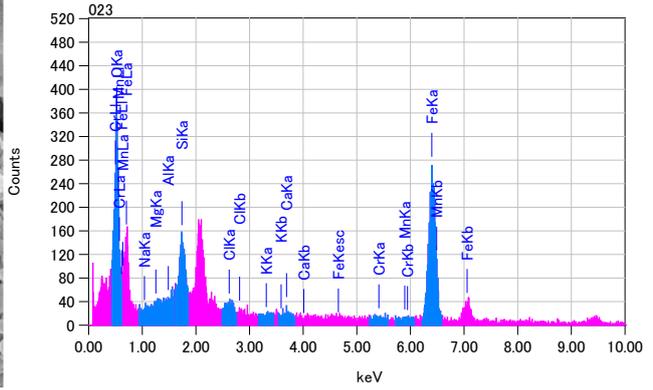
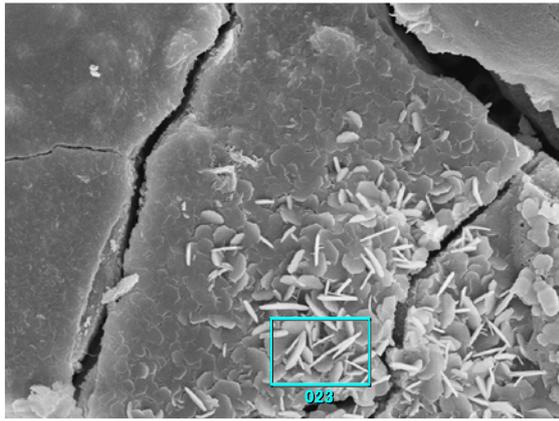


ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数 : 0.3494

全酸素数 : 6.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		36.21						
Na K	1.041	1.86	0.32	2.65	Na2O	2.51	0.21	1.7138
Mg K	1.253	0.95	0.27	2.56	MgO	1.57	0.10	0.8759
Al K								
Si K	1.739	20.34	0.28	47.41	SiO2	43.51	1.92	28.5042
K K	3.312	0.09	0.22	0.08	K2O	0.11	0.01	0.1710
Ca K	3.690	0.22	0.30	0.35	CaO	0.30	0.01	0.4347
Cr K	5.411	0.60	0.57	0.38	Cr2O3	0.88	0.03	1.1113
Mn K	5.894	0.42	0.68	0.51	MnO	0.55	0.02	0.7057
Fe K	6.398	39.30	0.74	46.07	FeO	50.56	1.87	66.4833
合計		100.00		100.00		100.00	4.18	

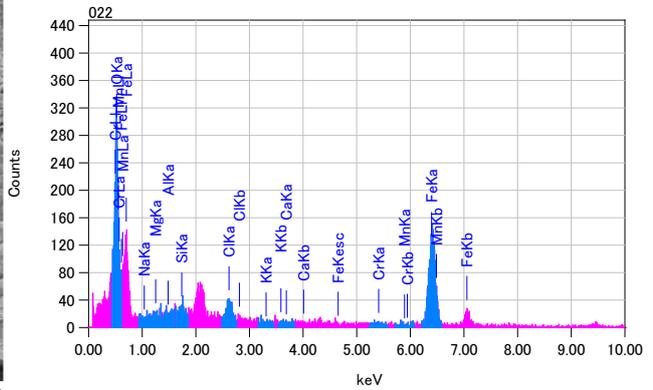
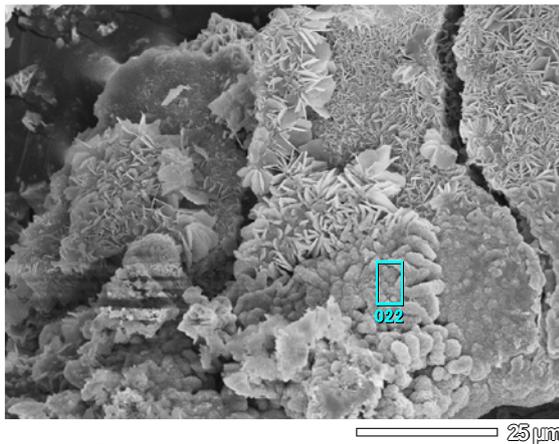
図 3.2.3-106 ASW5_E605 試料の界面スクレイプ試料(ferrosilite)



ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数 : 0.4564

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	23.91	0.18	50.52				32.8389
Na	1.041	0.03	0.40	0.05				0.0125
Mg	1.253	0.56	0.27	0.79				0.2281
Al								
Si	1.739	4.31	0.20	5.19				2.8261
Cl	2.621	0.62	0.19	0.59				0.5823
K	3.312	0.23	0.25	0.20				0.2311
Ca	3.690	0.36	0.29	0.30				0.3857
Cr	5.411	0.07	0.50	0.05				0.0740
Mn	5.894	1.56	0.71	0.96				1.3817
Fe	6.398	68.33	0.77	41.36				61.4396
合計		100.00		100.00				

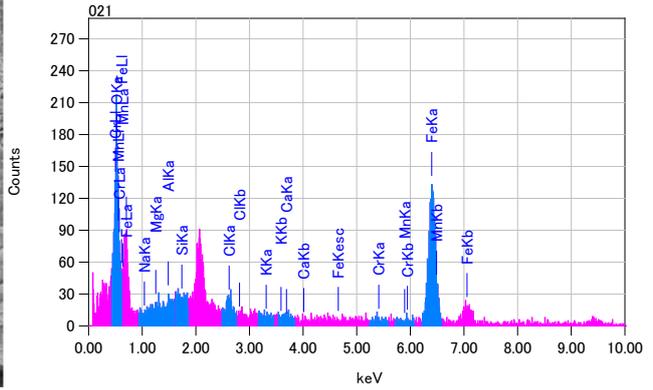
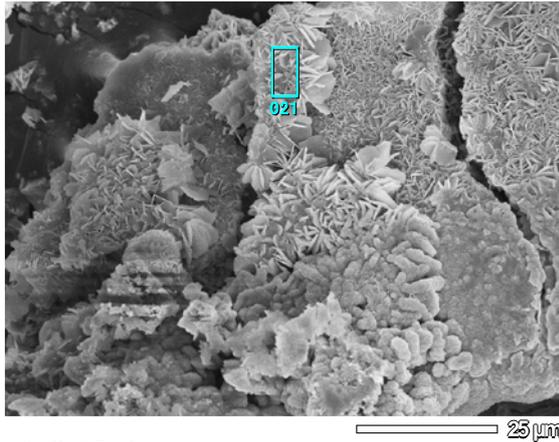
図 3.2.3-107 ASW5_E605 試料の界面スクレイプ試料(wustite)



ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数 : 0.4509

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	32.30	0.17	61.54				43.2639
Na								
Mg								
Al	1.486	0.00	0.22	0.00				0.0018
Si	1.739	1.18	0.19	1.28				0.7339
Cl	2.621	2.68	0.18	2.31				2.4040
K								
Ca								
Cr	5.411	0.52	0.49	0.30				0.4988
Mn	5.894	0.76	0.69	0.42				0.6286
Fe	6.398	62.55	0.75	34.14				52.4690
合計		100.00		100.00				

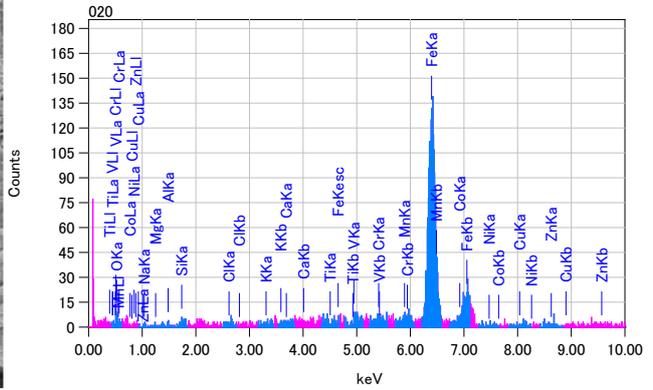
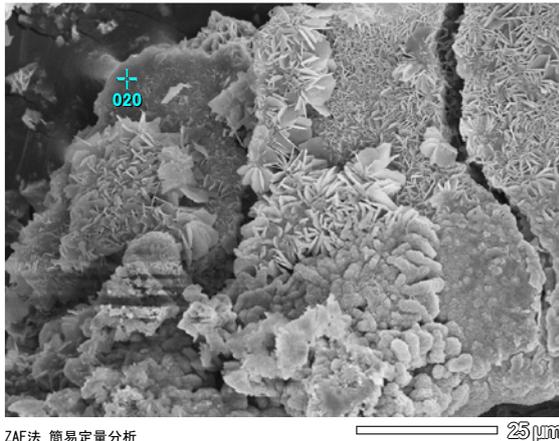
図 3.2.3-108 ASW5_E605 試料の界面スクレイプ試料(Fe(OH)₂)



ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数 : 0.4951

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	24.14	0.19	51.89				32.7196
Na								
Mg								0.3680
Al	1.486	0.73	0.25	0.94				
Si	2.621	1.98	0.20	1.92				1.8607
Cl	3.312	0.12	0.27	0.10				0.1142
K	3.690	0.66	0.31	0.57				0.7017
Ca	5.411	0.06	0.54	0.04				0.0593
Cr	5.894	0.65	0.77	0.41				0.5694
Mn	6.398	71.66	0.83	44.13				63.6070
Fe								
合計		100.00		100.00				

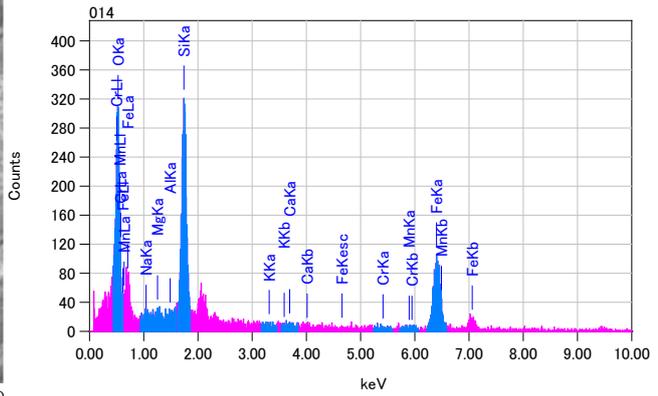
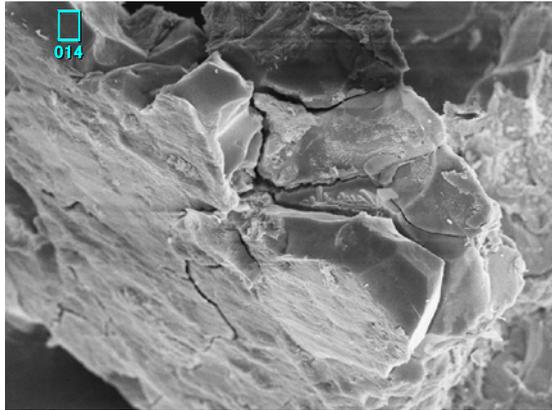
図 3.2.3-109 ASW5_E605 試料の界面スクレイプ試料(wustite)



ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数 : 0.4115

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	1.80	0.16	5.89				2.6230
Na	1.041	1.03	0.34	2.35				0.4020
Mg	1.253	0.10	0.22	0.22				0.0421
Al	1.486	0.20	0.18	0.39				0.1063
Si	1.739	0.20	0.16	0.37				0.1348
Cl	2.621	0.13	0.14	0.19				0.1325
K								
Ca								
Ti								
V	4.949	0.63	0.31	0.64				0.6733
Cr	5.411	1.15	0.36	1.16				1.3548
Mn	5.894	1.99	0.52	1.90				1.9549
Fe	6.398	90.73	0.56	85.17				90.6887
Co	6.924	0.18	0.77	0.16				0.1735
Ni	7.471	0.61	1.04	0.55				0.5743
Cu								
Zn	8.630	1.24	2.06	1.00				1.1397
合計		100.00		100.00				

図 3.2.3-110 ASW5_E605 試料の界面スクレイプ試料(Fe metal)



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数 : 0.3376
 全酸素数 : 6.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		35.76						
Na K	1.041	1.11	0.31	1.58	Na ₂ O	1.50	0.13	0.9949
Mg K	1.253	1.01	0.26	2.71	MgO	1.67	0.11	0.9108
Al K	1.486	0.15	0.26	0.18	Al ₂ O ₃	0.28	0.01	0.1632
Si K	1.739	19.69	0.27	45.86	SiO ₂	42.12	1.88	27.0981
K K	3.312	0.15	0.22	0.12	K ₂ O	0.18	0.01	0.2746
Ca K	3.690	0.40	0.29	0.65	CaO	0.56	0.03	0.7909
Cr K								
Mn K	5.894	0.86	0.65	1.03	MnO	1.12	0.04	1.4219
Fe K	6.398	40.87	0.71	47.87	FeO	52.58	1.96	68.3456
合計		100.00		100.00		100.00	4.18	

図 3.2.3-111 ASW5_E605 試料の界面スクレイプ試料(ferrosilite)

以上の観察・分析結果より、炭素鋼表面の腐食状態としては、海水系 5 年間の浸漬で、ベントナイト接触界面にすでに 10-20 μm の厚みでフェロシライト質ガラスが発達しているということがわかった。図 3.2.3-93 に示したように 10 年浸漬ではおよそ 80 μm のガラス質層が認められているため、このガラス質層は時間とともにその厚みをゆっくりではあるが成長させていると考えられる。そのガラス質を伴う腐食層は、界面直上の Fe(OH)₂ 層から始まり、フェロシライト質のガラス層、点在する溶離組織状の FeC や FeO (wustite)、グリーンナライト質蛇紋石と共存しており、最終的にはベントナイトに向かって、グリーンナライトから Fe サポナイトへと移行していくものと考えられる。

(4) 幌延腐食試験後試料

幌延腐食試験後試料の分析はベントナイトを対象に行う。

1) 試料の前処理

幌延地下で行われた腐食試験後にベントナイト緩衝材は解体し、解体直後に真空パック保管した。これらの一部を固相分析に用いた。図 3.2.3-112 に回収した試料の概観を示す。

これらのうち、上部から図中のブロック番号③、⑦、⑩について HRB-1, 2, 3 と名付けて各種分析に供した。

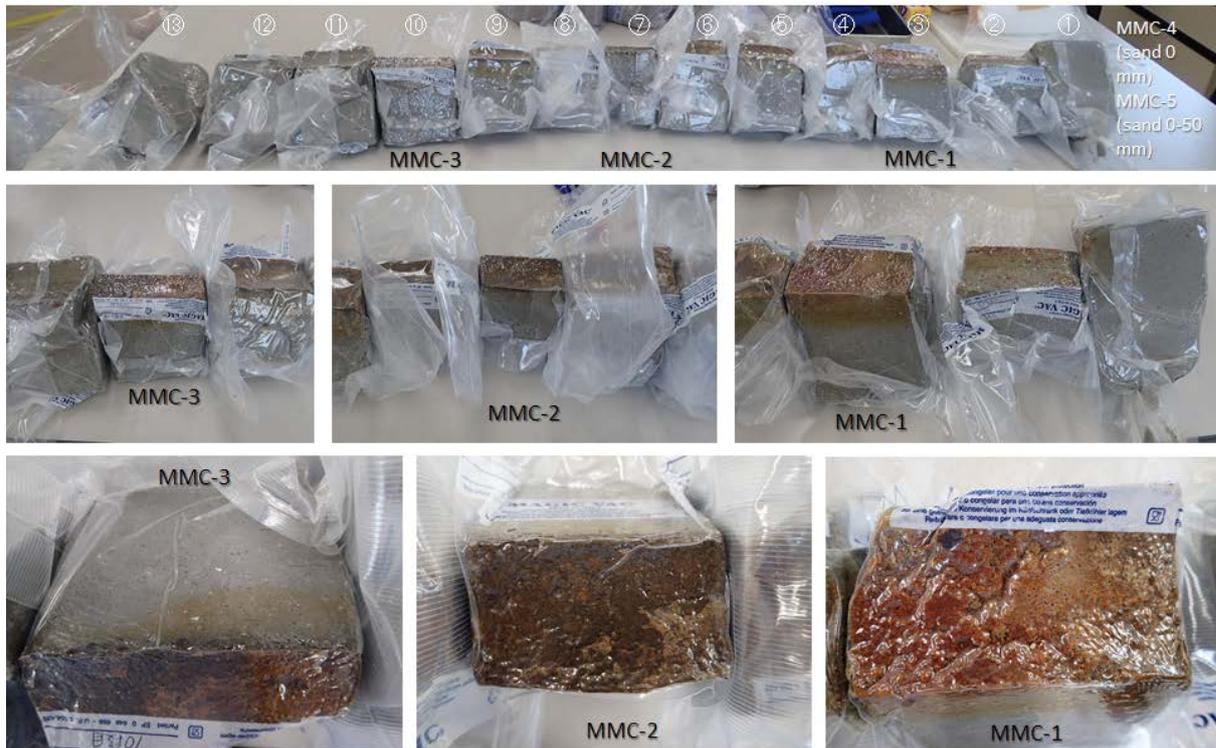


図 3.2.3-112 幌延腐食試験後に回収された緩衝材（真空パック保管）

2) EPMA 分析

回収した緩衝剤は真空乾燥の後、真空樹脂含浸処理を行い片面鏡面研磨した。試料の概観を図 3.2.3-113 に示す。より下部に位置する HRB-1 試料(幌延試験緩衝材ブロック③)では変質ゾーンの厚みが薄く、赤色を呈するが、より上部試料の HRB-2(ブロック⑦)と HRB-3 試料(ブロック⑩)ではシャープな境界を持って界面は暗褐色を呈しており、それらの厚みも 5 mm に達している。試料は写真撮影の後、炭素蒸着を施し EPMA 分析(元素マッピングとスポット分析)に供された。電子線プローブマイクロアナライザー(EPMA, JEOL JXA-8200)により、元素の分布を原則、マッピングモードで測定した。測定元素は、緩衝材の変質の程度に応じて、鉍物組成を検討できる元素(Si, Al, Ti, Fe, Cr, Ni, Cu, Mn, Mg, Ca, Na, K, S, Cl, C, O)を対象とした。炭素鋼試料については、接触面の Co についても分析項目に含めた。試料の概観を図 3.2.3-113 に示す。

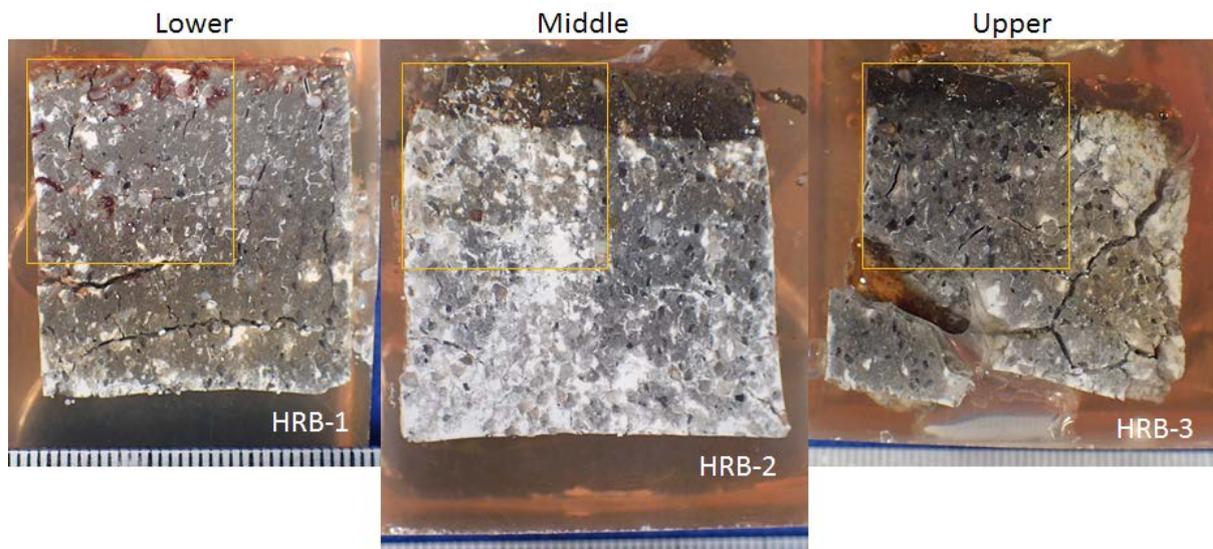


図 3.2.3-113 幌延炭素鋼接触ベントナイトの EPMA 分析試料の概観
(黄色の枠内がマッピング領域: 20x20 mm)

a HRB-1 (下部)

各元素のマッピング結果 (20x20 mm) を図 3.2.3-114 に示す。画像の上が炭素鋼との接触界面であるが、Fe に非常に富む領域は数 mm 程度の領域に限られており、それより内部 15 mm はやや Fe に富み、そこから内部は Ca に非常に富む領域に移行していることがわかる。

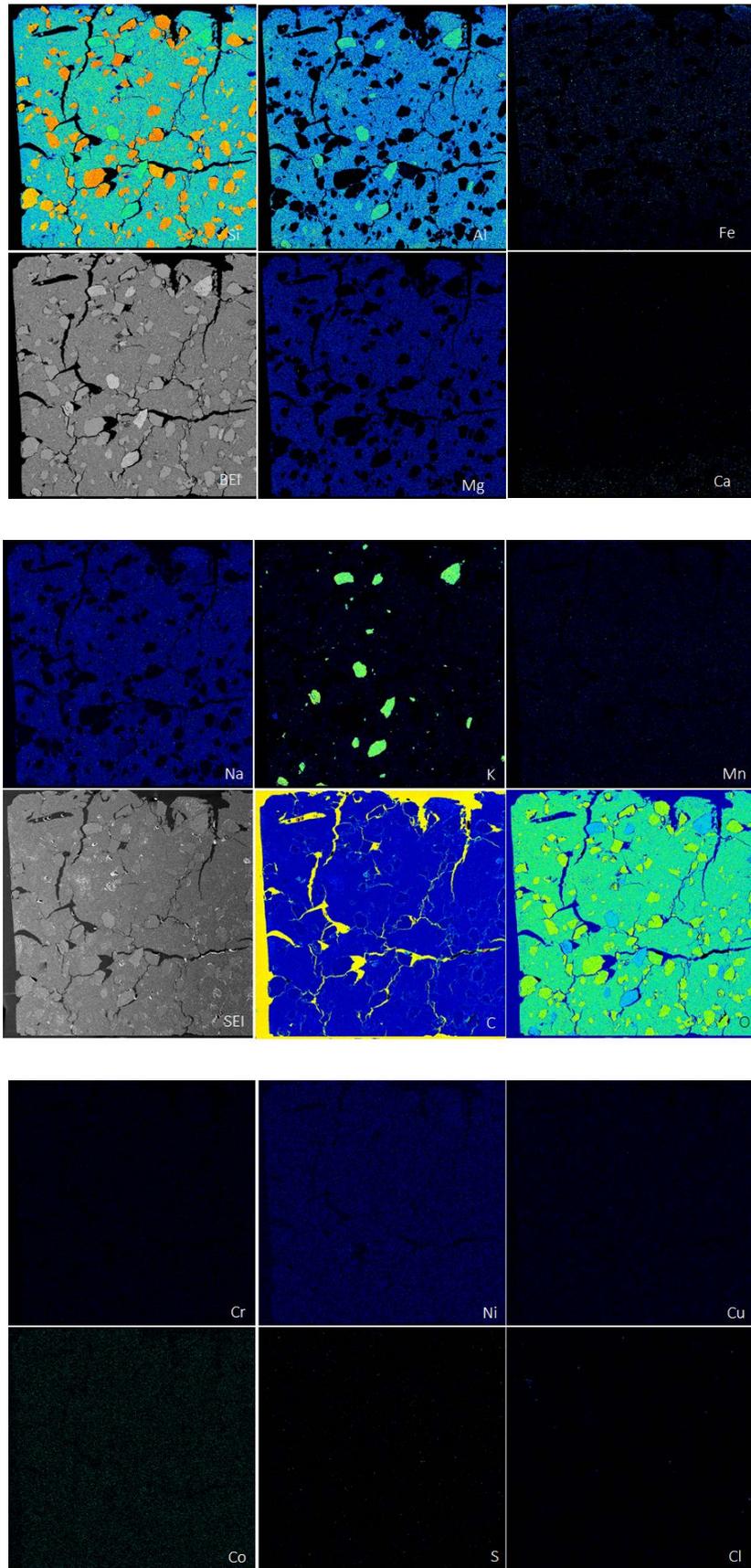


図 3.2.3-114 HRB-1 試料の EPMA 元素マップ

b HRB-2 (中間部)

各元素のマッピング結果を図 3.2.3-115 に示す。Fe に富む領域はやや広がり 5 mm 近くとなり、カラム下部と同様にその領域は Ca に乏しい。

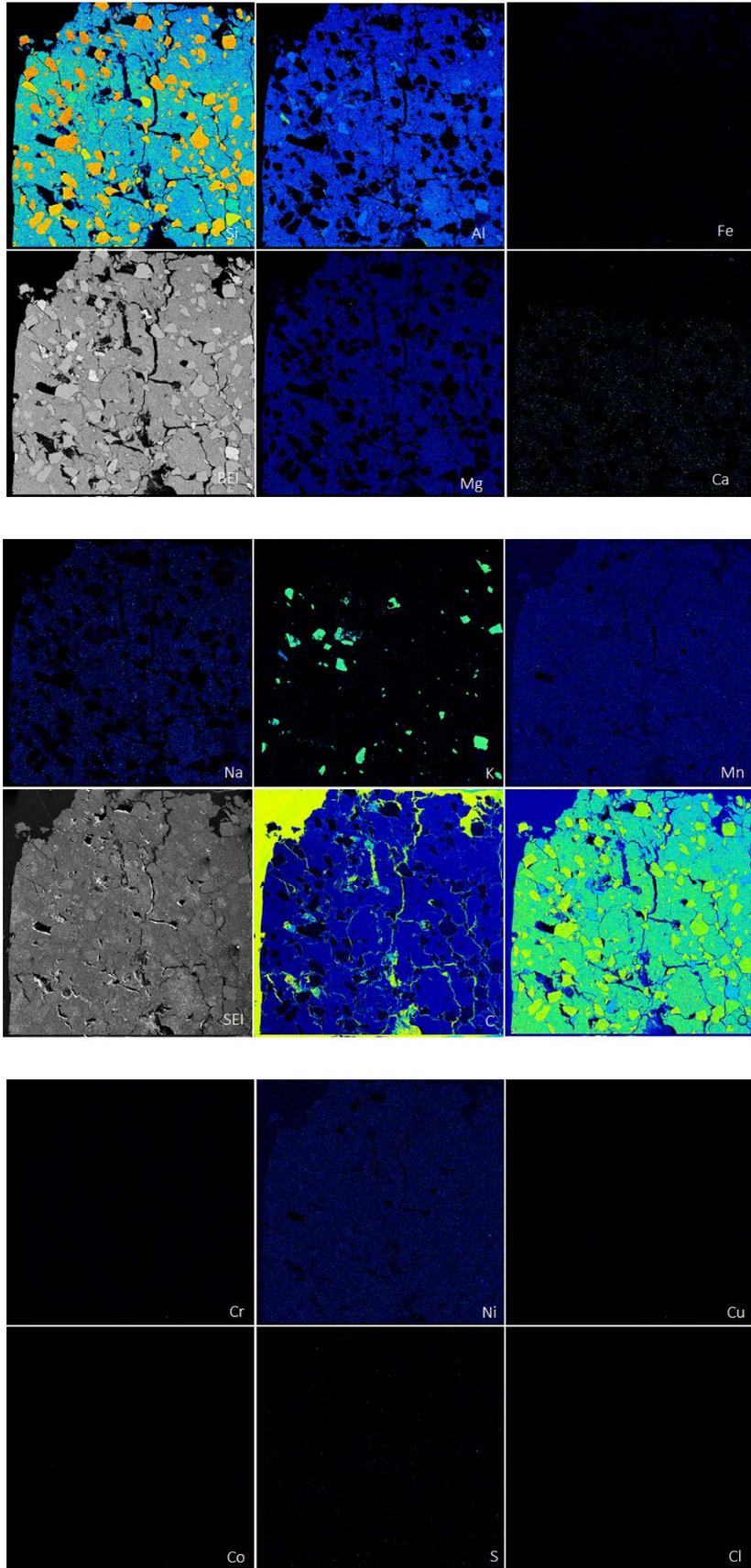


図 3.2.3-115 HRB-2 試料の EPMA 元素マップ

c HRB-3 (上部)

各元素のマッピング結果を図 3.2.3-116 に示す。界面近傍 5 mm 以下の領域は Fe に非常に富み Ca に乏しいことがわかる。

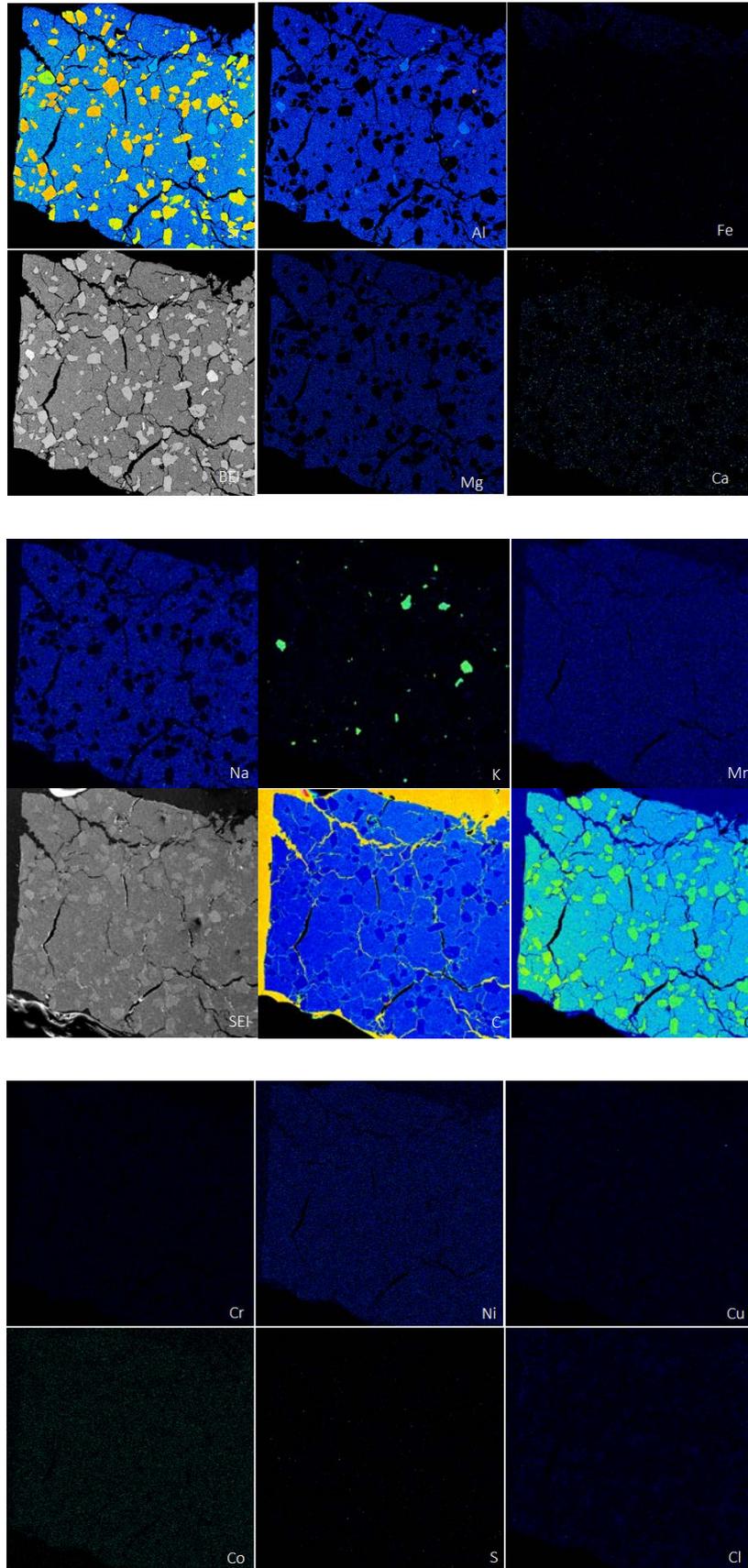


図 3.2.3-116 HRB-2 試料の EPMA 元素マップ

d Fe プロファイル

以上3つの回収試料におけるマッピング領域での Fe 組成の分布を炭素鋼接触界面から内部へのプロファイルとして図 3.2.3-117 に示す。測定結果はスポット分析によるスメクタイトの組成 (O = 22 として計算した構造式の陽イオン、atom per formula unit: apfu)として示した。カラム下位(HRB-1)よりも中位(HRB-2)、上位(HRB-3)が界面の Fe 含有量が増大していることがわかるが、特に中位において接触界面やそれより内部で Fe 含有量が大きいことが示されている。下位試料界面での非常に高濃度の Fe は、陽イオン組成からスメクタイトの上限(octahedral $M_{tot} = 4-6$, O = 22)を超えているが、Si 濃度は低くはないため鉄サポナイトと考えられる。

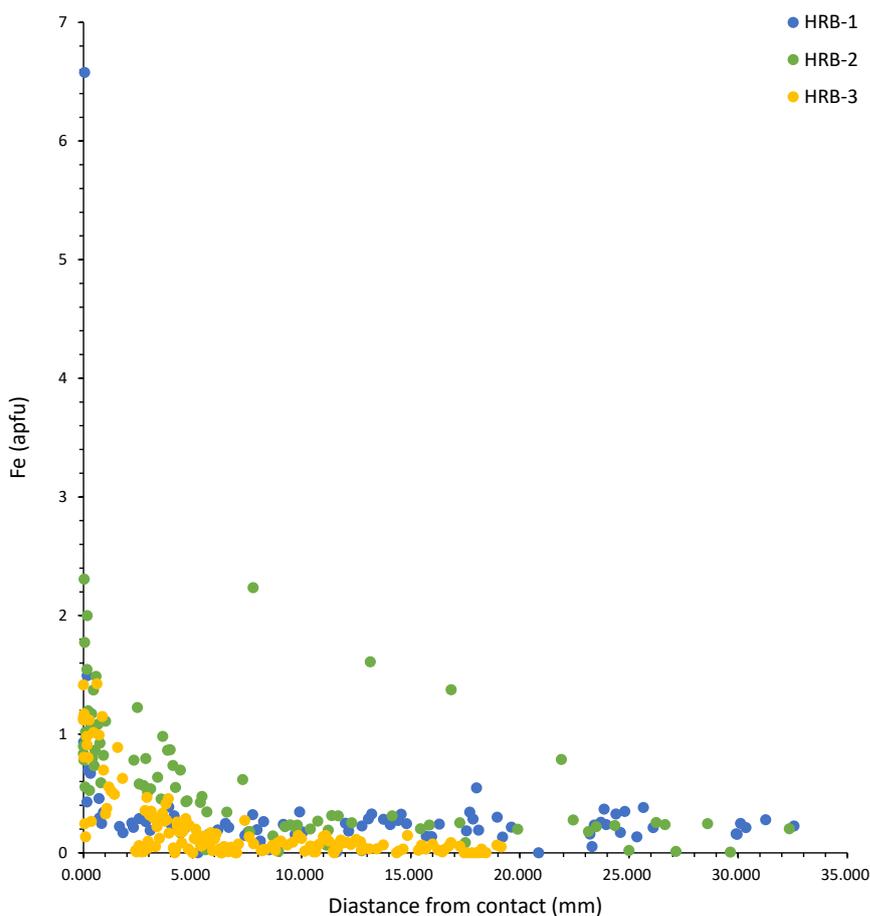
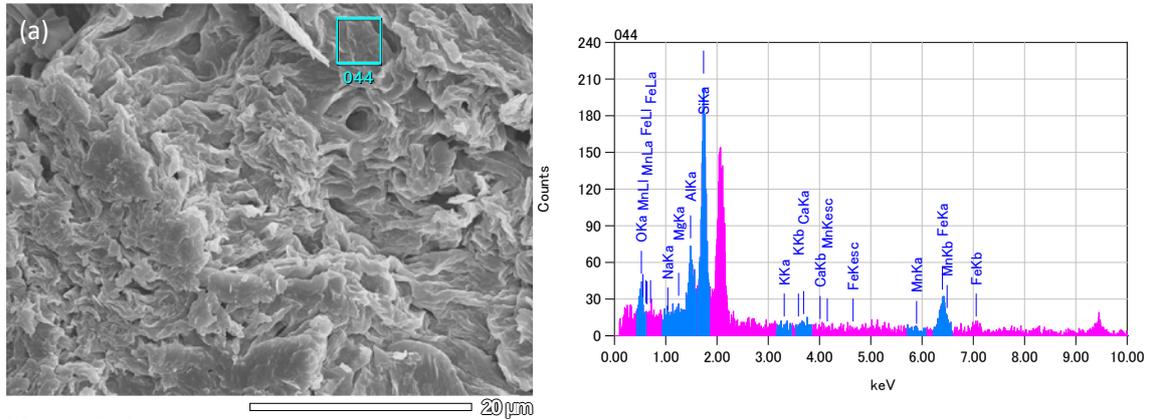


図 3.2.3-117 スメクタイトの Fe 含有量プロファイル(Fe apfu)

3) FESEM 観察及び EDS 分析

EDS 搭載電界放出型走査電子顕微鏡(FESEM-EDS,) 観察により変質鉱物の生成の有無を確認し、EDS により化学組成を分析した。観察対象とした試料は、ヒーターとなっている炭素鋼パイプ表面から削り取った。分析の精度を確認するために、代表的な鉄粘土鉱物として、ノントロナイトと鉄緑泥石のシャモサイトの天然標本の測定も併せて行った (図 3.2.3-118)。両鉱物とも構造式をそれぞれ O = 22, 14 を基準に計算した結果は良好で、それぞれの組成を概ね正しく測定しているといえる。よって、以下の分析はすべて簡易定量 (酸化物 ZAF 補正法に基づく) における

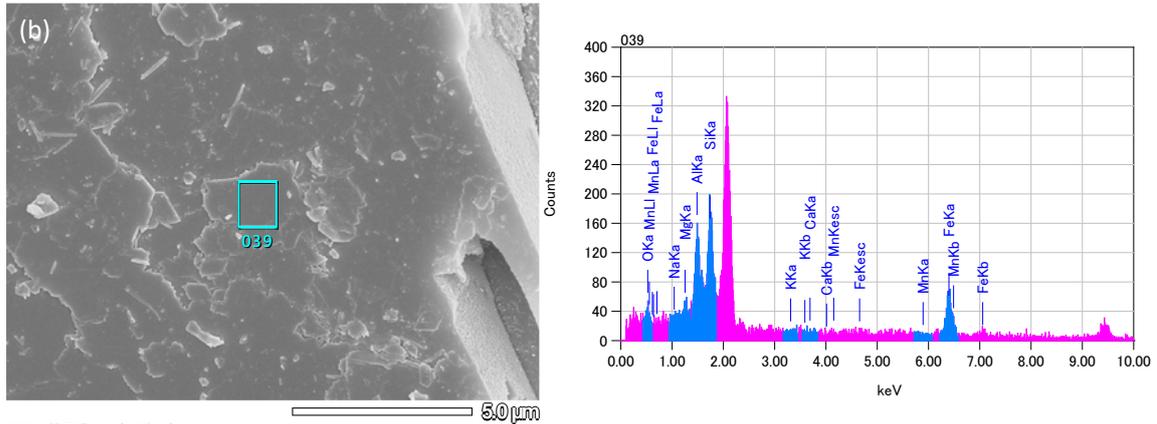
結果である。



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.6145
 全酸素数: 22.0

元素	(keV)	質量%	σ	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
0		43.18			ND			
Na K	1.041	0.44	0.64	0.79	Na2O	0.60	0.16	0.5316
Mg K	1.253	0.40	0.60	1.33	MgO	0.66	0.13	0.4746
Al K	1.486	5.78	0.99	8.75	Al2O3	10.93	1.75	8.3613
Si K	1.739	23.02	1.79	66.94	SiO2	49.24	6.68	37.9393
K K	3.312	0.06	0.28	0.06	K2O	0.07	0.01	0.1283
Ca K	3.690	0.70	0.44	1.42	CaO	0.97	0.14	1.5874
Mn K	5.894	1.83	0.65	2.72	MnO	2.36	0.27	3.4691
Fe K	6.398	24.60	1.79	17.99	Fe2O3	35.17	3.59	47.5084
合計		100.00		100.00		100.00	12.73	

Nontronite (Natural specimen)



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.6583
 全酸素数: 14.0

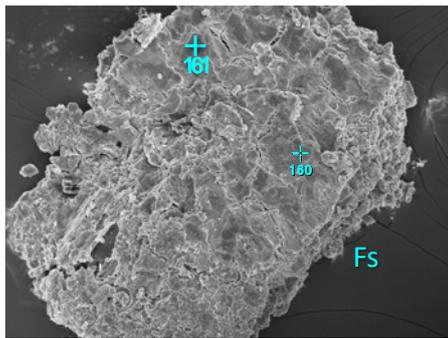
元素	(keV)	質量%	σ	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
0		36.40			ND			
Na K	ND	ND		ND	ND			
Mg K	1.253	2.83	0.71	8.11	MgO	4.69	0.72	2.8942
Al K	1.486	10.38	1.16	13.40	Al2O3	19.61	2.37	12.6610
Si K	1.739	12.78	1.47	31.71	SiO2	27.35	2.80	17.4858
K K	3.312	0.45	0.28	0.40	K2O	0.54	0.07	0.8775
Ca K	ND	ND		ND	ND			
Mn K	5.894	1.28	0.66	1.62	MnO	1.65	0.14	2.2342
Fe K	6.398	35.89	1.65	44.77	FeO	46.17	3.95	63.8475
合計		100.00		100.00		100.00	10.05	

Chamosite (Natural specimen)

図 3.2.3-118 鉄粘土鉱物標本における FESEM-EDS 分析結果

a HRB-0

試験試料の観察結果を図 3.2.3-119 から図 3.2.3-123 に示す。



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.4584
 全酸素数: 6.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	40.52							
Na K	1.041	2.73	0.39	3.88	Na2O	3.68	0.28	3.3079
Mg K	1.253	2.34	0.35	6.30	MgO	3.89	0.23	2.7429
Al K	1.486	5.60	0.36	6.78	Al2O3	10.58	0.49	7.7609
Si K	1.739	22.31	0.41	51.88	SiO2	47.72	1.88	35.5770
K K								
Ca K	3.690	0.38	0.44	0.61	CaO	0.53	0.02	0.8470
Fe K	6.398	26.12	1.07	30.55	FeO	33.61	1.11	49.7643
合計		100.00		100.00		100.00	4.01	

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.4584
 全酸素数: 6.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	40.52							
Na K	1.041	2.73	0.39	3.88	Na2O	3.68	0.28	3.3079
Mg K	1.253	2.34	0.35	6.30	MgO	3.89	0.23	2.7429
Al K	1.486	5.60	0.36	6.78	Al2O3	10.58	0.49	7.7609
Si K	1.739	22.31	0.41	51.88	SiO2	47.72	1.88	35.5770
K K								
Ca K	3.690	0.38	0.44	0.61	CaO	0.53	0.02	0.8470
Fe K	6.398	26.12	1.07	30.55	FeO	33.61	1.11	49.7643
合計		100.00		100.00		100.00	4.01	

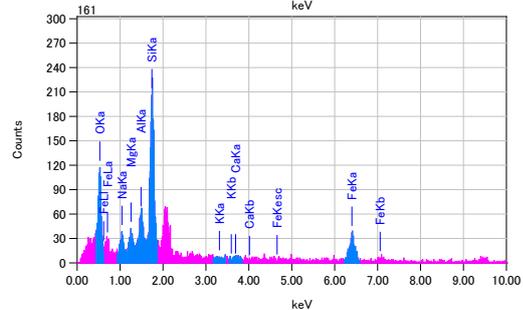
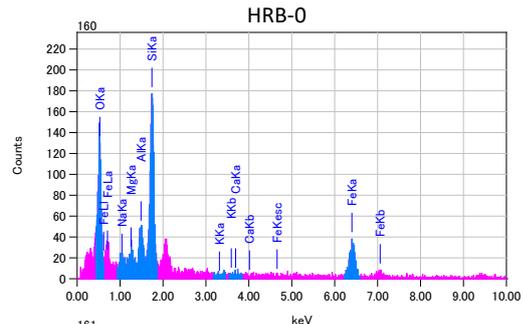
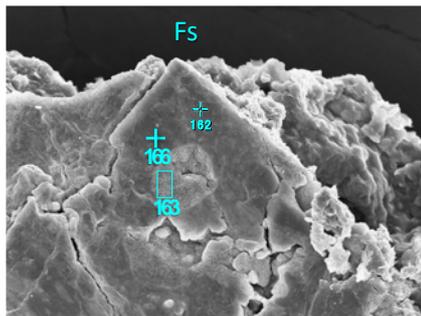


図 3.2.3-119 幌延腐食試験のヒーターパイプ最表面の腐食生成物(HRB-0)



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.4523
 全酸素数: 6.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	39.91							
Na K	1.041	2.32	0.45	3.32	Na2O	3.13	0.24	2.6385
Mg K	1.253	1.15	0.40	3.11	MgO	1.91	0.11	1.2748
Al K	1.486	4.25	0.41	5.17	Al2O3	8.03	0.38	5.8939
Si K	1.739	22.87	0.45	53.49	SiO2	48.93	1.96	35.6697
K K								
Ca K	3.312	0.10	0.37	0.09	K2O	0.12	0.01	0.2101
Fe K	6.398	0.57	0.49	0.93	CaO	0.80	0.03	1.2412
合計		100.00		100.00		100.00	3.98	

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.3791
 全酸素数: 6.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	40.10							
Na K	1.041	3.55	0.33	5.03	Na2O	4.78	0.37	4.1545
Mg K	1.253	1.38	0.30	3.70	MgO	2.29	0.14	1.5527
Al K	1.486	3.64	0.30	4.39	Al2O3	6.87	0.32	4.9171
Si K	1.739	23.51	0.33	54.56	SiO2	50.29	2.00	37.2769
K K								
Ca K	3.312	0.47	0.27	0.59	K2O	0.56	0.03	0.9620
Fe K	6.398	27.36	0.89	31.93	FeO	35.20	1.17	51.1367
合計		100.00		100.00		100.00	4.03	

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.4557
 全酸素数: 6.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	40.98							
Na K	1.041	3.20	0.36	4.54	Na2O	4.31	0.33	3.9799
Mg K	1.253	2.05	0.32	5.50	MgO	3.39	0.20	2.4346
Al K	1.486	5.39	0.33	6.52	Al2O3	10.19	0.47	7.6084
Si K	1.739	23.31	0.37	54.19	SiO2	48.87	1.94	37.7895
K K								
Ca K	3.312	0.11	0.31	0.48	K2O	0.61	0.03	0.8470
Fe K	6.398	0.23	0.41	0.37	CaO	0.32	0.01	0.5139
合計		100.00		100.00		100.00	4.00	

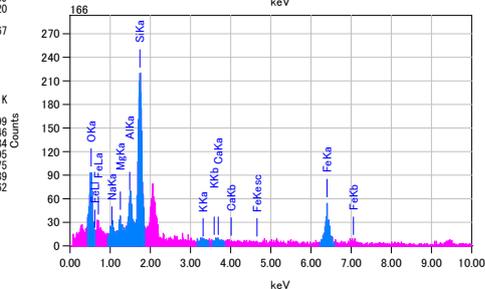
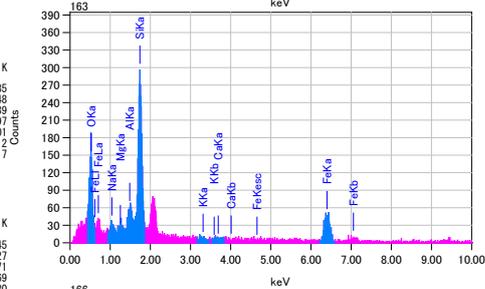
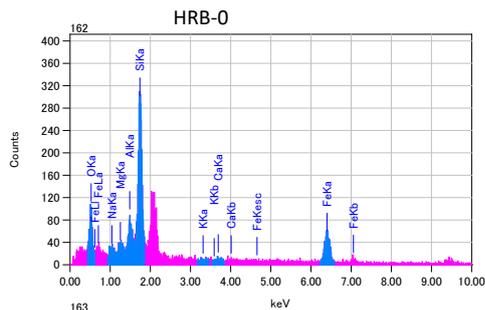


図 3.2.3-120 幌延腐食試験のヒーターパイプ表面の結晶質腐食生成物(HRB-0)

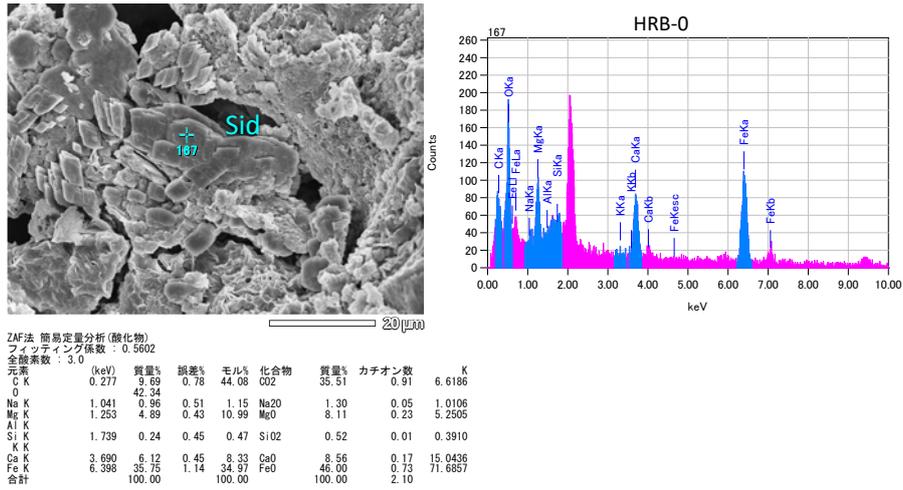


図 3.2.3-121 幌延腐食試験のヒーターパイプ表面の炭酸塩鉱物(HRB-0)

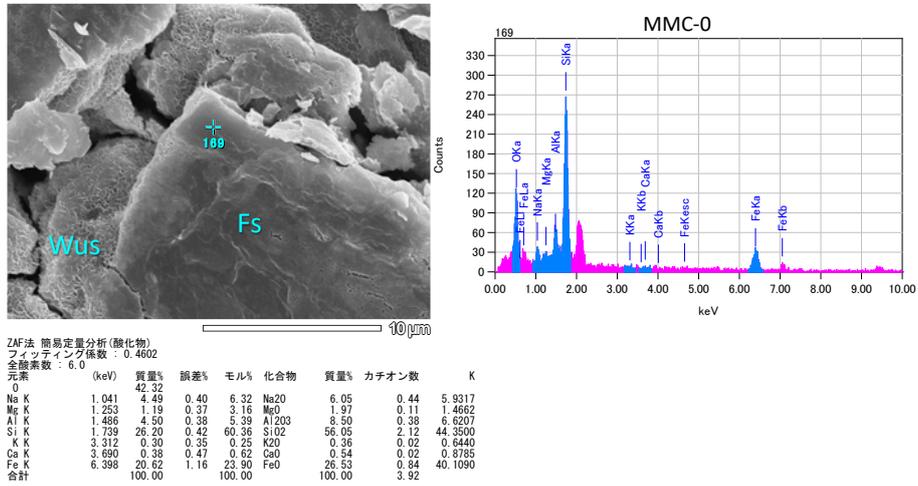


図 3.2.3-122 幌延腐食試験のヒーターパイプ表面の結晶質腐食生成物(HRB-0)

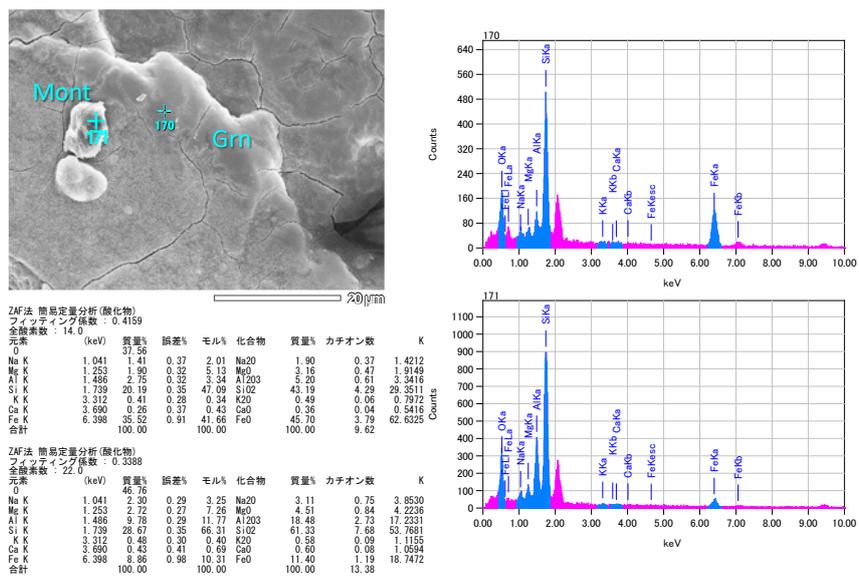


図 3.2.3-123 幌延腐食試験のヒーターパイプ表面の蛇紋石質腐食生成物(HRB-0)

以上の観察より、炭素鋼ヒーターパイプ表面にはケイ酸塩鉱物と考えられる結晶質の二次鉱物が生成していることがわかった。化学組成からは NaAl オンファス輝石($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$)と NaFe エジリン輝石 ($\text{NaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$) の成分を持った鉄輝石である。また、輝石の表面は鉄に富む酸化物に覆われていることが多く、またひび割れた産状の鉄蛇紋石のグリーンナライトも観測される。さらに鉄輝石は鉄オリビンであるファイアライト(Fe_2SiO_4)としばしば共存しており、これが水和したものがグリーンナライトであると考えられる。しかし、共存するスメクタイトは元のモンモリロナイトの成分をよく維持しており、サポナイト化は認められず、すべてノントロナイト成分を持ったモンモリロナイトである。

b HRB-1

界面近傍試料 HRB-1-1 (0 mm)における測定結果を図 3.2.3-124 に示す。モンモリロナイトの組成変化はあまり認められず、ノントロナイト成分として Fe は 1.2 apfu 程度と小さい。

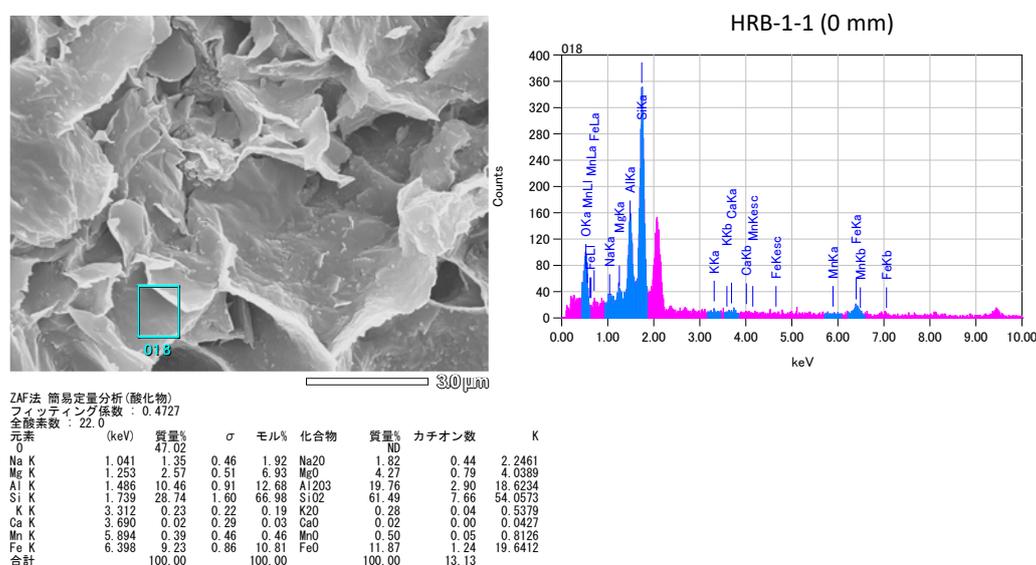
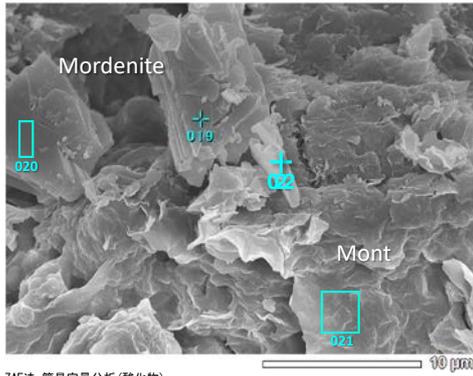


図 3.2.3-124 HRB-1 接触界面試料(0 mm)の FESEM-EDS 分析結果

しかし、この試料の界面には粘土や炭酸塩以外の変質鉱物としてゼオライトが認められる(図 3.2.3-125)。組成的には Si-rich でわずかに Ca を含んでいることから、モルデナイトに分類されるものである。オリジナルのクニゲルV 1にはクリノプチロライトもしくはアナルサイムが含まれているが、この界面近傍ベントナイト試料のゼオライトは、新たにその場で生成したものであると考えられる。



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)									
フィッティング係数: 0.5415									
全酸素数: 24.0									
元素	(keV)	質量%	σ	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K	
O		51.01				ND			
Na K	1.041	1.32	0.60	1.81	Na2O	1.78	0.43	2.3709	
Mg K		ND				ND			
Al K	1.486	6.28	1.03	7.35	Al2O3	11.86	1.75	12.0420	
Si K	1.739	38.57	2.25	86.79	SiO2	82.52	10.34	79.0025	
K K	3.312	0.10	0.31	0.08	K2O	0.12	0.02	0.2320	
Ca K	3.690	2.00	0.55	3.15	CaO	2.90	0.38	4.8617	
Mn K		ND				ND			
Fe K	6.398	0.72	0.70	0.81	FeO	0.92	0.10	1.4909	
合計		100.00		100.00		100.00		13.01	

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)									
フィッティング係数: 0.3435									
全酸素数: 36.0									
元素	(keV)	質量%	σ	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K	
O		49.48				ND			
Na K	1.041	4.93	0.56	6.84	Na2O	6.65	2.50	9.0115	
Mg K		ND				ND			
Al K	1.486	7.02	0.77	8.30	Al2O3	13.27	3.03	13.1096	
Si K	1.739	35.52	1.71	80.69	SiO2	76.00	14.72	70.9955	
K K		ND				ND			
Ca K	3.690	1.50	0.35	2.38	CaO	2.09	0.43	3.6694	
Mn K	5.894	0.71	0.36	0.82	MnO	0.91	0.15	1.4504	
Fe K	6.398	0.94	0.42	0.96	FeO	1.08	0.18	1.7605	
合計		100.00		100.00		100.00		21.01	

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)									
フィッティング係数: 0.6971									
全酸素数: 22.0									
元素	(keV)	質量%	σ	モル%	化合物	質量%	カチオン数	Counts	
O		45.13				ND			
Na K		ND				ND			
Mg K	1.253	0.91	0.70	2.42	MgO	1.51	0.29	1.2251	
Al K	1.486	5.35	1.32	6.41	Al2O3	10.11	1.55	8.5076	
Si K	1.739	30.20	2.65	69.50	SiO2	64.60	8.39	53.8201	
K K		ND				ND			
Ca K	3.690	0.65	0.71	1.06	CaO	0.92	0.13	1.5192	
Mn K	5.894	3.27	1.30	3.84	MnO	4.22	0.46	6.3359	
Fe K	6.398	14.49	1.97	16.77	FeO	18.64	2.02	28.5920	
合計		100.00		100.00		100.00		12.84	

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)									
フィッティング係数: 0.4712									
全酸素数: 36.0									
元素	(keV)	質量%	σ	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K	
O		49.26				ND			
Na K	1.041	1.90	0.48	2.63	Na2O	2.57	0.97	3.2871	
Mg K	1.253	0.78	0.44	2.03	MgO	1.29	0.37	1.2423	
Al K	1.486	6.59	0.81	7.75	Al2O3	12.45	2.85	12.1022	
Si K	1.739	35.41	1.72	80.09	SiO2	75.75	14.74	70.1063	
K K	3.312	0.49	0.24	0.40	K2O	0.59	0.15	1.1145	
Ca K	3.690	1.68	0.41	2.66	CaO	2.35	0.49	4.0793	
Mn K		ND				ND			
Fe K	6.398	3.90	0.73	4.43	FeO	5.01	0.82	8.0683	
合計		100.00		100.00		100.00		20.39	

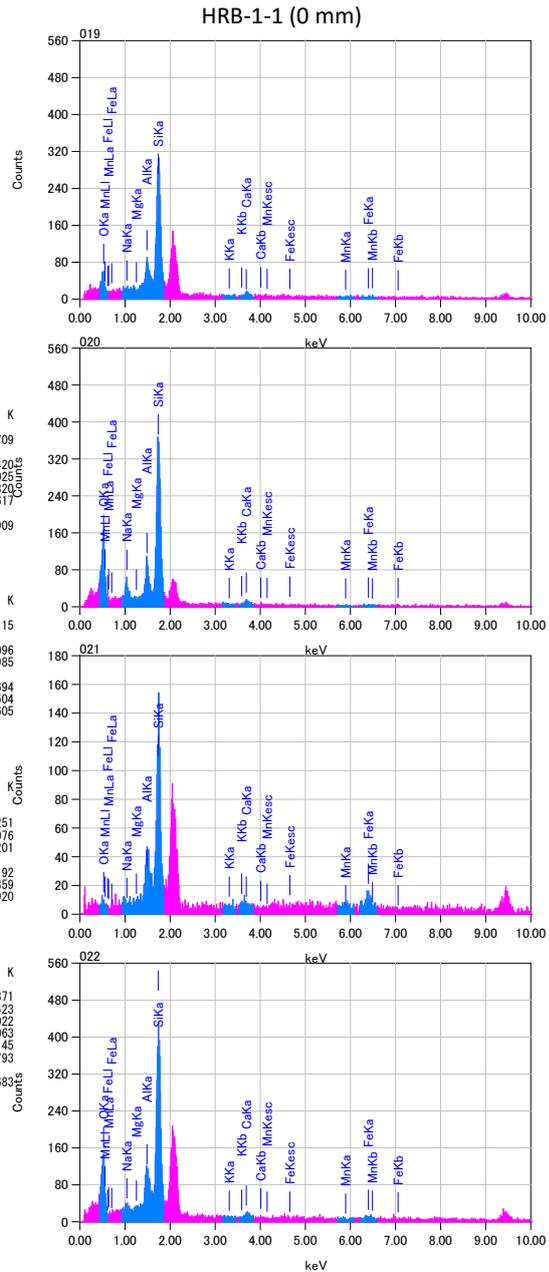


図 3.2.3-125 HRB-1 接触界面試料(0 mm)の FESEM-EDS 分析結果(その2)

界面から遠い試料 HRB-1-5 (25 mm)における測定結果を図 3.2.3-126 に示す。Fe の影響は組成(0.31 apfu)からは確認できない。

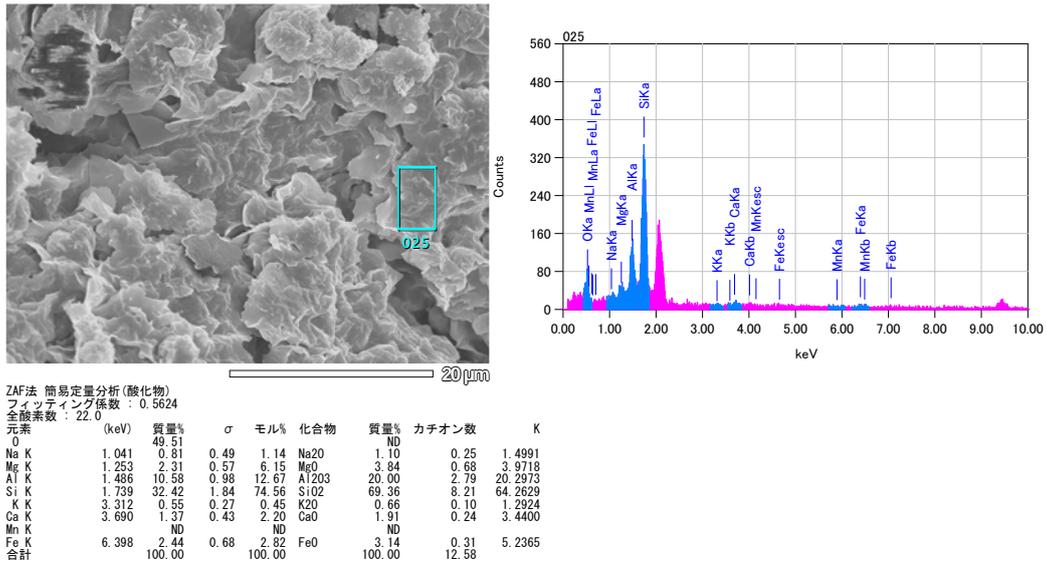


図 3.2.3-126 HRB-1 接触界面遠方試料(25 mm)の FESEM-EDS 分析結果

c HRB-2

試験ベントナイトとしては中間に位置するこの試料のモンモリロナイト組成はおおむね初期状態を維持しており、構造式上、0.5 apfu のわずかなノントロナイト成分が認められる程度であり顕著な変質は確認できなかった (図 3.2.3-127)。

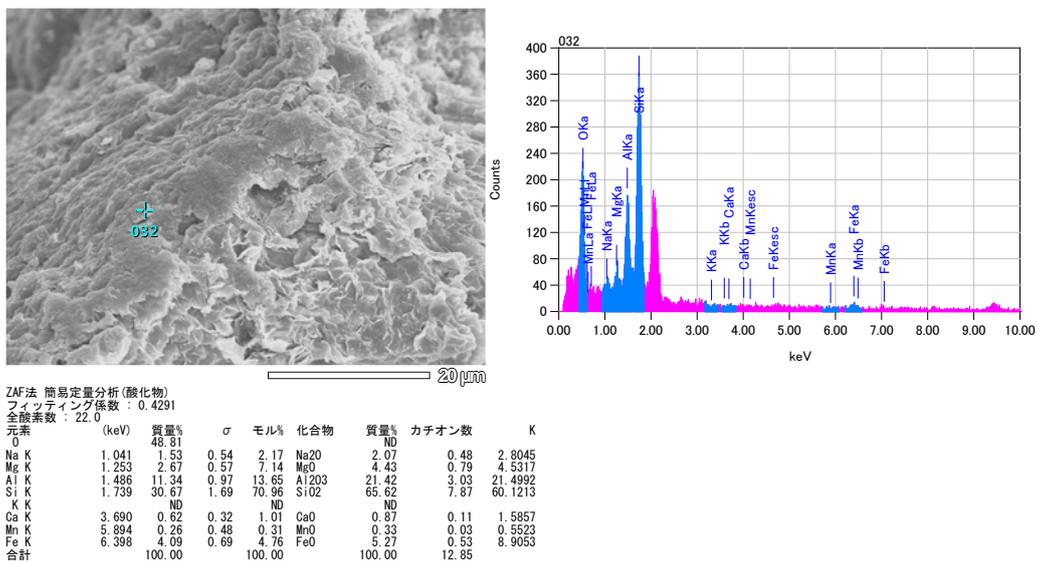


図 3.2.3-127 HRB-2 接触界面試料の FESEM-EDS 分析結果

d HRB-3

試験ベントナイトとしては上位に位置するこの試料でもモンモリロナイト組成はおおむね維持されており、構造式上、1.4 apfu のわずかなノントロナイト成分が認められる程度である (図 3.2.3-128)。

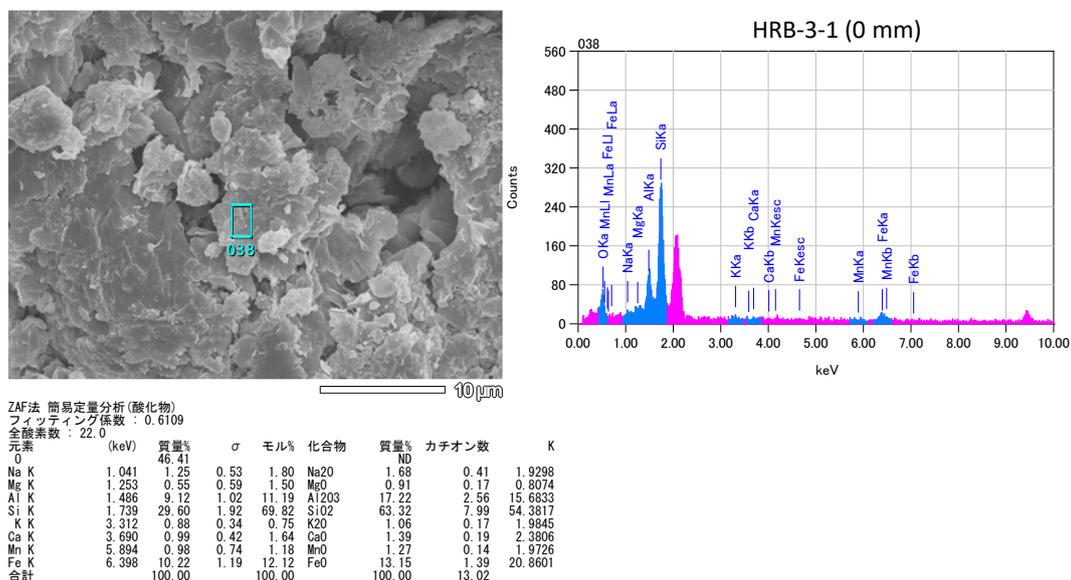


図 3.2.3-128 HRB-3 接触界面試料の FESEM-EDS 分析結果

以上の観察より、幌延試験試料においてベントナイト側の変質は、炭素鋼界面において、鉄炭酸塩、鉄蛇紋石、鉄輝石やオリビンなどの出現として確認できるのみであり、ベントナイト内部へは、Si-rich ゼオライトの出現と、わずかなノントロナイト成分として Fe が富化しているだけで、3八面体スメクタイト (サポナイト) への変質は起きていなかった。

4) XRF 分析

ベントナイト試料は3つのレベルに対応するブロック (HRB-1, 2, 3) において、界面から内部まで3か所 (on steel, near steel, off steel) の全岩 XRF 分析を実施した。結果を表 3.2.3-13 に示す。界面に向かって Fe 含有量がある値に向かって増えている傾向はどのレベルにおいても同様であるが、上位の試料ほど内部の Fe 含有量は大きくなっていることが図 3.2.3-129 から読み取れる。

表 3.2.3-13 回収されたベントナイトの全岩化学分析値

Horonobe steel-bentonite									
Sample ID	HRB-1-1	HRB-1-2	HRB-1-5	HRB-2-1	HRB-2-2	HRB-2-5	HRB-3-1	HRB-3-2	HRB-3-5
Position	on steel (upper)	near steel	off steel	on steel	near steel	off steel	off steel (lower)	near steel	off steel
SiO ₂	76.73	78.78	76.55	75.84	77.80	78.84	75.37	78.55	78.52
TiO ₂	0.22	0.22	0.41	0.22	0.23	0.24	0.22	0.22	0.21
Al ₂ O ₃	11.67	12.00	10.30	12.69	12.86	11.92	12.34	12.24	12.17
Fe ₂ O ₃	6.92	3.97	4.35	5.61	2.61	2.35	6.70	2.99	2.22
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
MnO	0.13	0.08	0.19	0.07	0.09	0.08	0.09	0.07	0.07
MgO	1.33	1.27	0.68	1.62	1.57	1.43	1.63	1.45	1.50
CaO	0.91	1.51	5.19	1.70	2.60	3.05	1.55	2.16	3.19
Na ₂ O	0.41	0.37	0.00	0.59	0.54	0.18	0.48	0.45	0.37
K ₂ O	0.85	0.93	1.47	0.88	0.97	0.94	0.92	1.08	0.94
P ₂ O ₅	0.18	0.15	0.14	0.19	0.17	0.12	0.20	0.15	0.16
SO ₃	0.47	0.49	0.73	0.46	0.47	0.65	0.44	0.49	0.46
Cl	0.18	0.22	0.00	0.13	0.09	0.20	0.07	0.15	0.17
-O	0.04	0.05	0.00	0.03	0.02	0.05	0.02	0.03	0.04
total	99.82	99.78	100.00	99.97	99.98	99.95	99.98	99.97	99.96

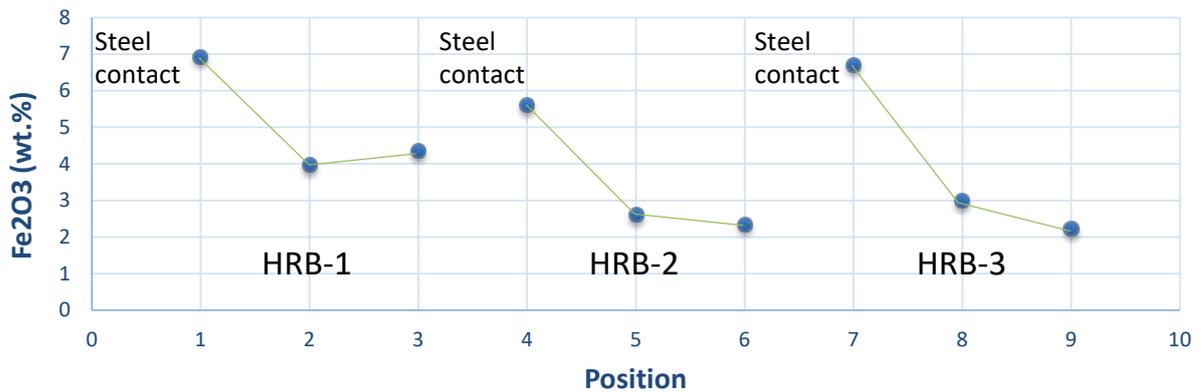


図 3.2.3-129 幌延ベントナイト試験試料の Fe 含有量のプロファイル

5) XRD 分析

X線管球を 30 kV, 20 mA に設定し、 $2\theta = 0-70^\circ$ を 2 時間かけるという設定で測定を行った。リートベルト解析は Bulker TOPAS と結晶データベース ICDD にある鉱物結晶データにフィッティングして行った。

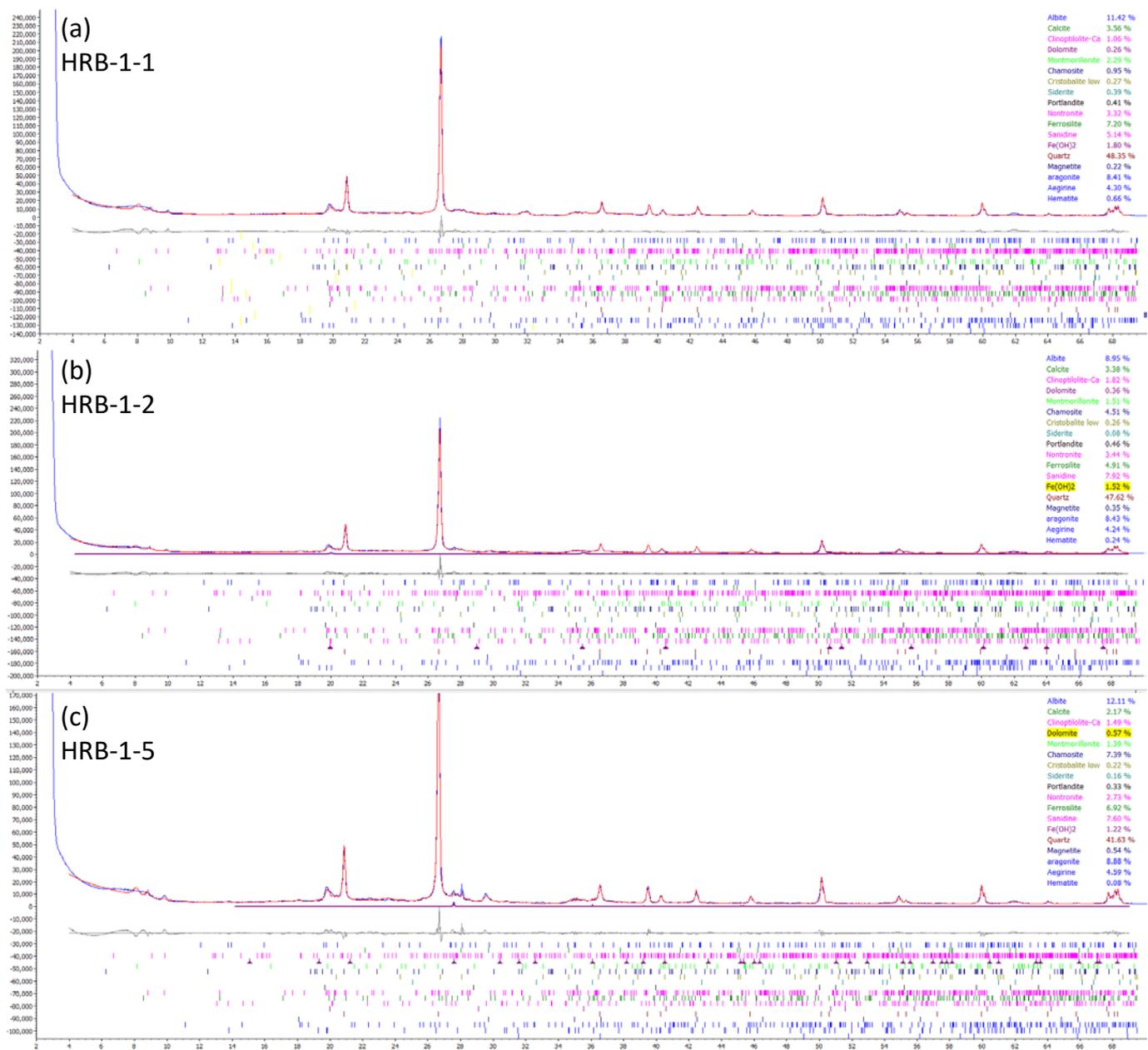
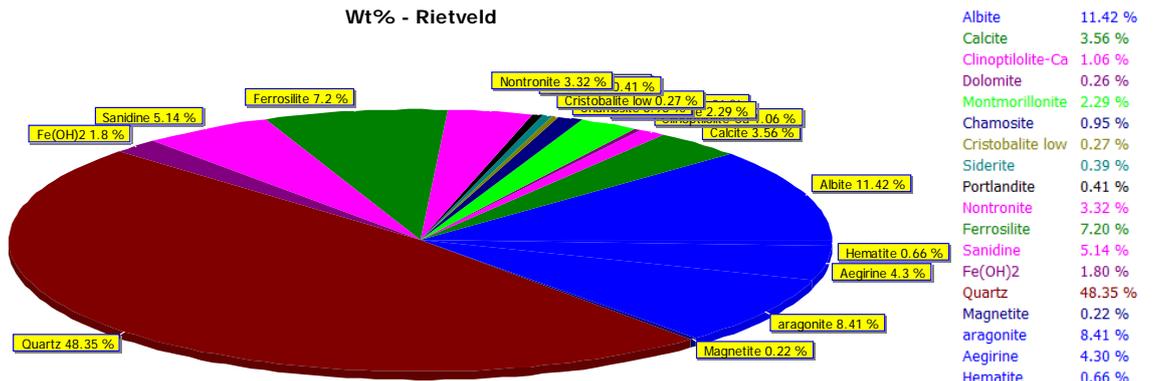
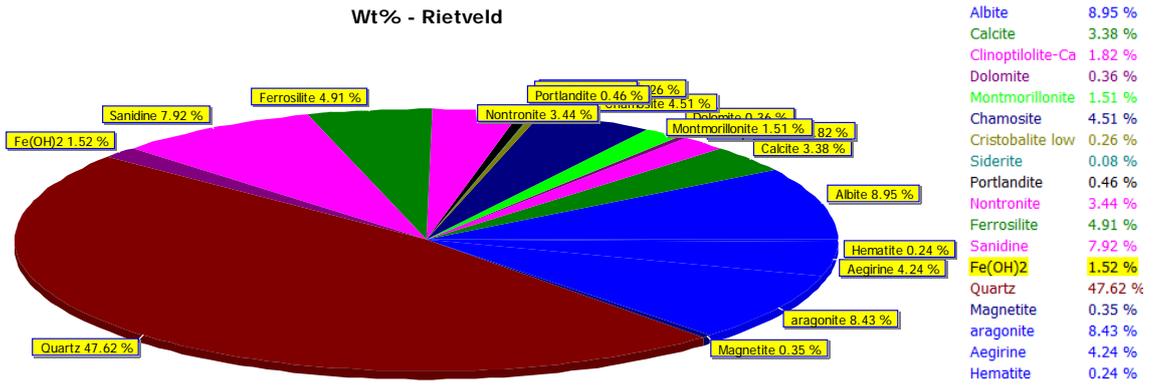


図 3.2.3-130 HRB-1 試料の XRD リートベルト解析

HRB-1-1



HRB-2-1



HRB-3-1

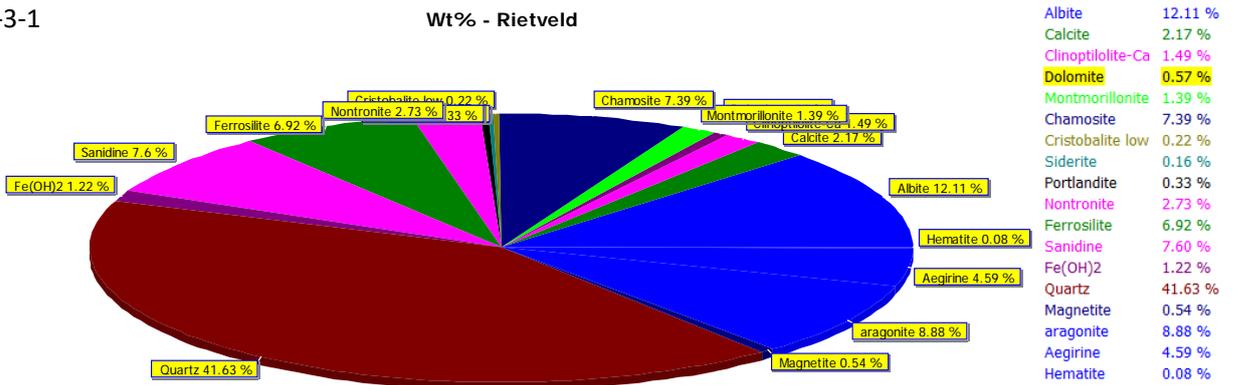
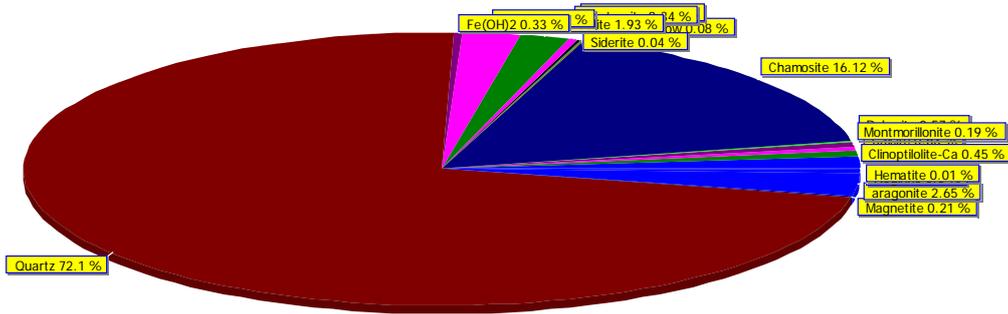


図 3.2.3-131 XRD-Rietveld 解析結果 (界面近傍試料)

HRB-4 (upper sand)

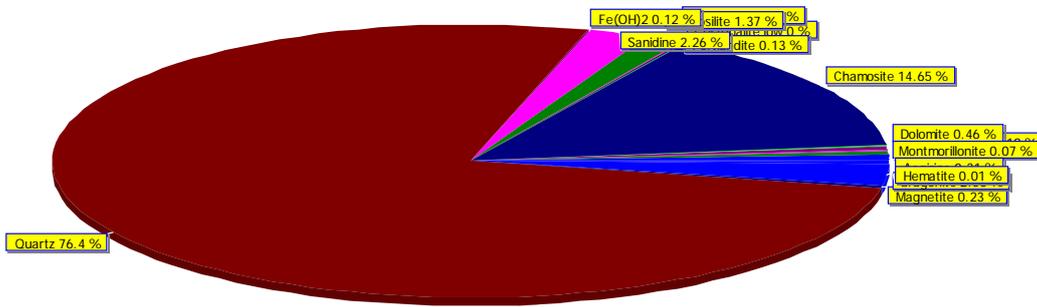
Wt% - Rietveld



Albite	1.52 %
Calcite	0.63 %
Clinoptilolite-Ca	0.45 %
Dolomite	0.57 %
Montmorillonite	0.19 %
Chamosite	16.12 %
Cristobalite low	0.08 %
Siderite	0.04 %
Portlandite	0.15 %
Nontronite	0.34 %
Ferrosilite	1.93 %
Sanidine	2.20 %
Fe(OH)2	0.33 %
Quartz	72.10 %
Magnetite	0.21 %
aragonite	2.65 %
Aegirine	0.50 %
Hematite	0.01 %

HRB-5 (lower sand)

Wt% - Rietveld



Albite	0.80 %
Calcite	0.31 %
Clinoptilolite-Ca	0.19 %
Dolomite	0.46 %
Montmorillonite	0.07 %
Chamosite	14.65 %
Cristobalite low	0.00 %
Siderite	0.02 %
Portlandite	0.13 %
Nontronite	0.09 %
Ferrosilite	1.37 %
Sanidine	2.26 %
Fe(OH)2	0.12 %
Quartz	76.40 %
Magnetite	0.23 %
aragonite	2.56 %
Aegirine	0.31 %
Hematite	0.01 %

図 3.2.3-132 XRD-Rietveld 解析結果 (シリカ砂試料)

Compositional profile (Rietveld-XRD)

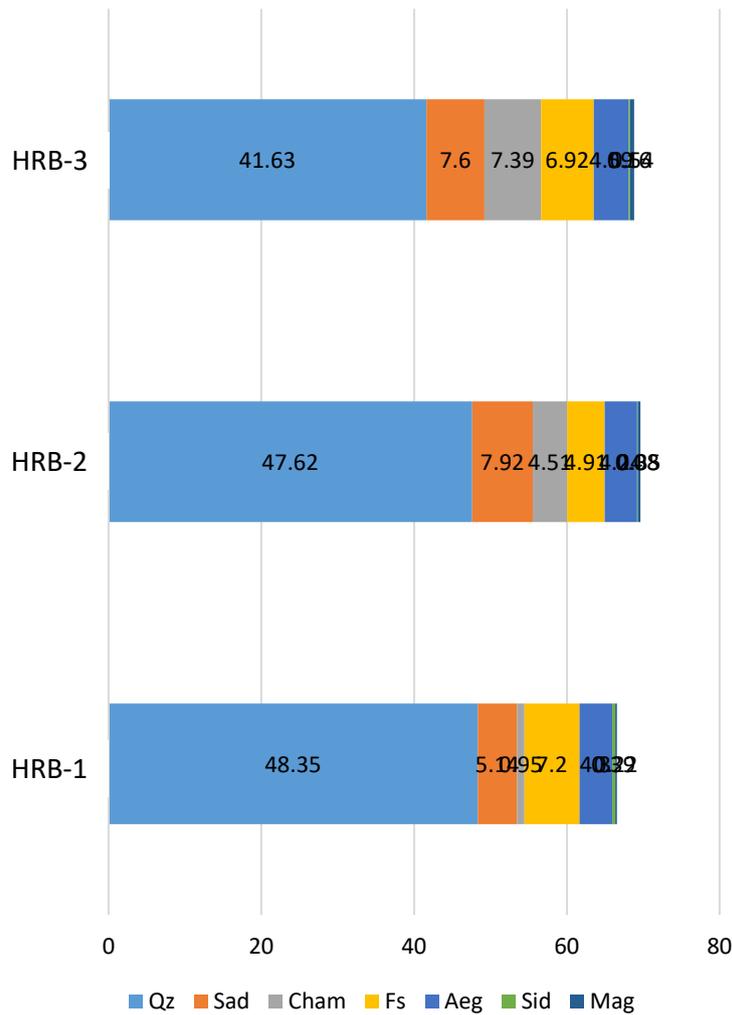


図 3.2.3-133 幌延炭素鋼接触ベントナイトの構成鉱物組成変化

6) マイクロ XRD 測定

垂直方向に異なる位置の炭素鋼接触界面試料(HRB-0, HRB-1, HRB-2, HRB-3)のマイクロ XRD 測定結果を図 3.2.3-134 に示す。炭素鋼ヒーター接触部ではシデライトのピークが鋭い。上部に向かって HRB-1, 2, 3 試料まで元のベントナイトのピークが鋭く、物質として強く変質していないことがわかるが、わずかに鉄輝石であるフェロシライトとシデライトのピークが確認できる。

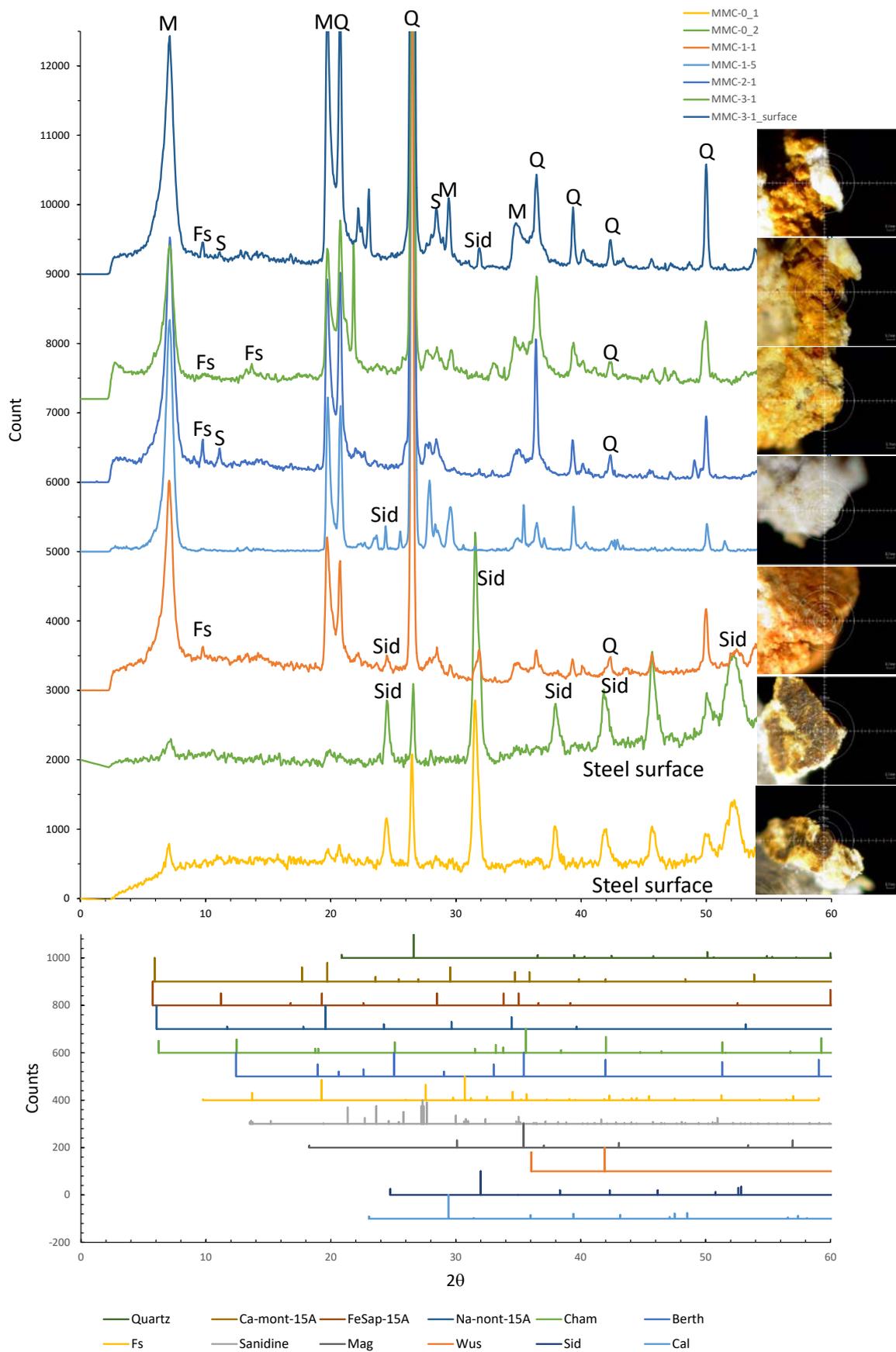


図 3.2.3-134 幌延腐食試験の緩衝材界面試料のマイクロ XRD パターン

7) 陽イオン交換容量(CEC)測定

XRD, XRF 分析に用いた粉碎試料において、CEC 測定を行った。結果を図 3.2.3-40 と表 3.2.3-14 に示す。Fe 含有量が増えてベントナイトとしての変質が認められる上位試料においても、CEC 値は変わっておらず、モンモリロナイトもしくは同等のイオン交換能を持つ（層間イオンサイト数が同じ）スメクタイトとしての総量は減少していないと解釈できる。これに対し、下位ベントナイトは CEC がやや減少しており、モンモリロナイト量が減少しているが、これは Fe 変質によって、上位ほどモンモリロナイトが別の非イオン交換性鉱物に変換されたと考えられる XRF 分析による Fe 含有量の傾向とは矛盾する。しかし、リートベルト解析では HRB-3 試料では同じくモンモリロナイト量が減少している傾向が見られ、このことから、CEC 値の低下はモンモリロナイトのその場の変質を反映したものではなく、モンモリロナイトの随伴鉱物の割合の増加を表している可能性が考えられる。試験のシステムでは下位から上位への流れを与えており、その通水パスが存在することから、膨潤空間ではあるが、水で満たされた空間がある。ベントナイト中の随伴鉱物はその空間から落下などで分別し、また相対的にモンモリロナイトが移動したのであれば、ベントナイト中の鉱物割合は初期から変化できることになる。追加分析として、CEC 計算には用いていないが、溶出した Fe 組成も分析されている。これをプロットすると、下位試料で界面近傍ほど Fe は高く、上位に向かって元の組成へと収束している。つまり、確かに Fe は炭素鋼を溶出してモンモリロナイト層間に交換しているが、上位に向かってその傾向が弱くなっていくのは、Fe はモンモリロナイトに強く固定されてしまい、通水によっては移動していないことを暗示している。XRD 分析で定量されたように、ケイ砂中にもモンモリロナイト粒子そのものが分別されていることは、ベントナイトシステムそのものがわずかに開放系になっていることを示している。もしも水みちを突き止めることができれば、その場の密度と CEC 値は低下しているはずである。

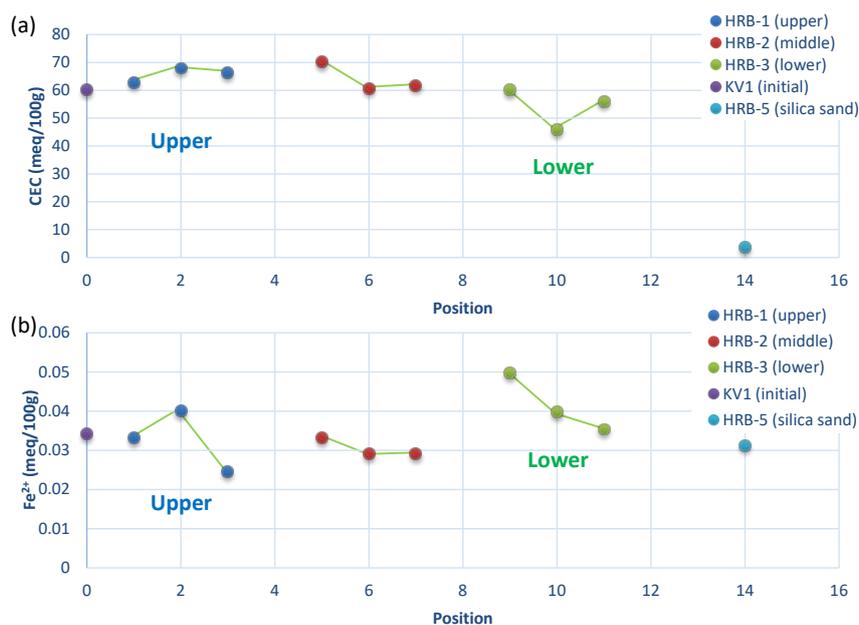


図 3.2.3-135 幌延ベントナイト試験試料の CEC(a)と層間 Fe²⁺(b)のプロファイル

表 3.2.3-14 幌延ベントナイト試験試料の CEC 測定結果

Sample ID	n	Ca [meq/100g]	Mg [meq/100g]	K [meq/100g]	Na [meq/100g]	Cation extracted [meq/100g]	CEC [meq/100g]	Fe [meq/100g]
HRB-1-1	1	7.82	3.29	1.73	30.71	43.56	63.10	0.034
	2	7.37	3.10	1.64	29.13	41.24	62.70	0.032
	Ave.	7.59	3.20	1.68	29.92	42.40	62.90	0.033
HRB-1-2	1	12.96	2.70	1.36	25.23	42.23	69.90	0.056
	2	16.12	3.30	1.55	28.58	49.56	65.90	0.024
	Ave.	14.54	3.00	1.45	26.91	45.90	67.90	0.040
HRB-1-5	1	27.03	4.83	1.52	26.26	59.65	67.70	0.024
	2	26.59	4.74	1.49	26.30	59.12	65.10	0.025
	Ave.	26.81	4.79	1.51	26.28	59.38	66.40	0.025
HRB-2-1	1	27.78	6.40	2.20	31.01	67.39	67.50	0.034
	2	19.69	5.25	1.64	28.50	55.08	72.70	0.033
	Ave.	23.74	5.82	1.92	29.76	61.24	70.10	0.033
HRB-2-2	1	24.02	4.65	1.61	27.75	58.03	58.50	0.029
	2	33.71	6.11	1.98	33.00	74.80	62.90	0.029
	Ave.	28.87	5.38	1.80	30.37	66.42	60.70	0.029
HRB-2-5	1	32.11	7.07	1.85	29.95	70.98	61.30	0.029
	2	27.59	6.22	1.65	28.04	63.49	62.30	0.029
	Ave.	29.85	6.64	1.75	28.99	67.23	61.80	0.029
HRB-3-1	1	20.37	6.16	1.71	29.74	58.00	68.70	0.051
	2	22.91	6.65	1.69	29.97	61.22	51.50	0.048
	Ave.	21.64	6.41	1.70	29.86	59.61	60.10	0.050
HRB-3-2	1	19.21	4.65	1.44	24.20	49.50	48.70	0.042
	2	27.21	5.95	1.77	29.19	64.12	43.10	0.038
	Ave.	23.21	5.30	1.60	26.70	56.81	45.90	0.040
HRB-3-5	1	30.17	7.13	1.43	24.66	63.38	61.10	0.032
	2	31.99	7.46	1.51	25.51	66.48	51.10	0.039
	Ave.	31.08	7.29	1.47	25.09	64.93	56.10	0.035
HRB-5 (silica sand)	1	1.33	0.23	0.12	1.59	3.27	3.10	0.032
	2	1.31	0.24	0.15	1.62	3.32	4.30	0.030
	Ave.	1.32	0.23	0.14	1.60	3.29	3.70	0.031
KV1	1	20.37	6.16	1.71	29.74	58.00	68.70	0.035
	2	22.91	6.65	1.69	29.97	61.22	51.50	0.034
	Ave.	21.64	6.41	1.70	29.86	59.61	60.10	0.034

8) 溶液分析

回収された溶液は上流側の通水地下水溶液であり、組成からは NaCl に富む海水系地下水に近いもの (SO₄ は低い) であることがわかる。また密度の正確な値がないため、間隙水組成推定はできないが、各固相試料を 45 ml 純水での洗浄後に回収した溶液組成も示した。参考として後述する室内腐食試験にて回収された間隙水組成を IH-F_{pore} 試料として分析結果を示した。

表 3.2.3-15 回収された溶液および固相試料の洗浄溶液の化学組成

No.	Solution	ID	pH	Eh (mV)	Si (ppm)	Al	Fe	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	Mn(ppb)	Cu(ppb)	Cr(ppb)	Ni(ppb)
1	HRB- inlet1	HRB-I1	7.29	272. 1	30.13	0.0 3	0.0 1	23.5 8	51.1 0	3119.8 3	175.3 4	5155. 7	13.8	0.0	0.38	0.10	0.22
2	HRB- inlet2	HRB-I2	7.96	229. 1	26.16	0.0 3	0.0 1	35.9 1	55.3 8	3324.2 0	107.0 8	5487. 7	8.1	0.4	2.13	0.31	0.34
3	HRB- 1_pore	HRB- 1PW	not analyzed		0.61	0.0 0	0.0 1	0.01	0.01	17.08	0.38	8.0	5.3	0.0	0.00	0.04	0.01
4	HRB- 2_pore	HRB- 2PW			1.31	0.0 2	0.0 1	0.05	0.00	29.70	0.70	17.7	11.3	0.1	0.01	0.04	0.01
5	HRB- 3_pore	HRB- 3PW			0.91	0.0 1	0.0 1	0.01	0.01	20.39	0.45	10.9	6.0	0.1	0.03	0.04	0.01
6	HRB- 4_pore	HRB- 4PW			1.65	0.1 4	0.0 1	1.28	0.19	36.11	0.78	24.1	5.7	4.9	0.10	0.01	0.01
7	HRB- 5_pore	HRB- 5PW			1.57	0.0 6	0.0 1	1.57	0.20	21.06	1.01	25.3	2.0	0.5	0.18	0.11	0.01
8	IH- F_pore	IH- FPW	8.76	156. 3	4.10	0.0 3	0.0 1	8.08	10.0 9	3169.5 9	32.40	3168. 0	1296. 0	53.3	8.18	0.50	7.20

(5) 室内腐食試験後試料

1) 試料の前処理

室内腐食試験試料については、グローブボックス内で解体したものを真空パック保管し、真空乾燥処理して成型、分離した。試料の回収作業を図 3.2.3-136 に示す。

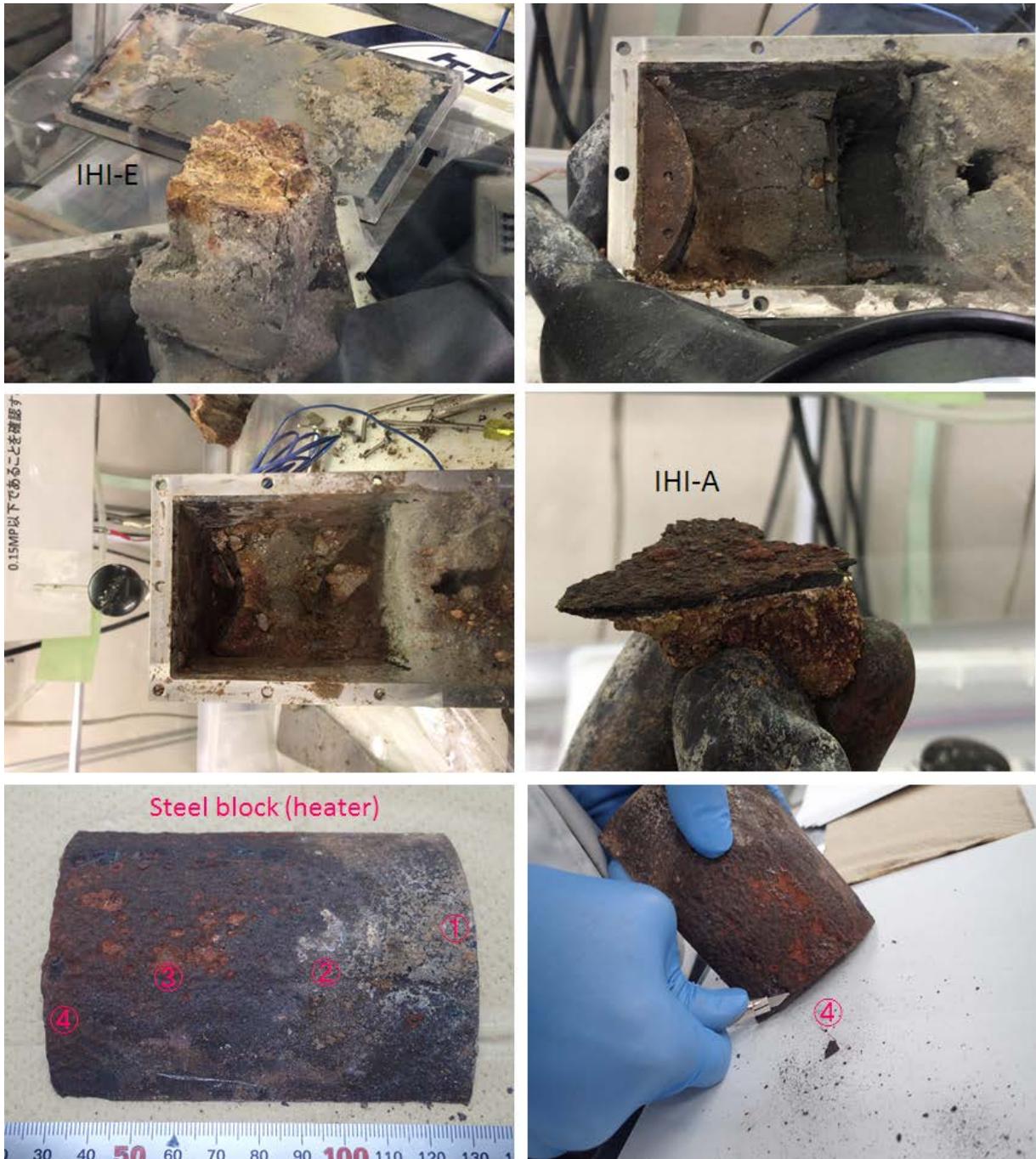


図 3.2.3-136 室内腐食試験試料の回収

2) EPMA 分析

分析に用いた試料の元のチップの概観を図 3.2.3-137 に示す。A-1, 2 と E-1, 2 は XRD などの粉末分析に用いた部位である。

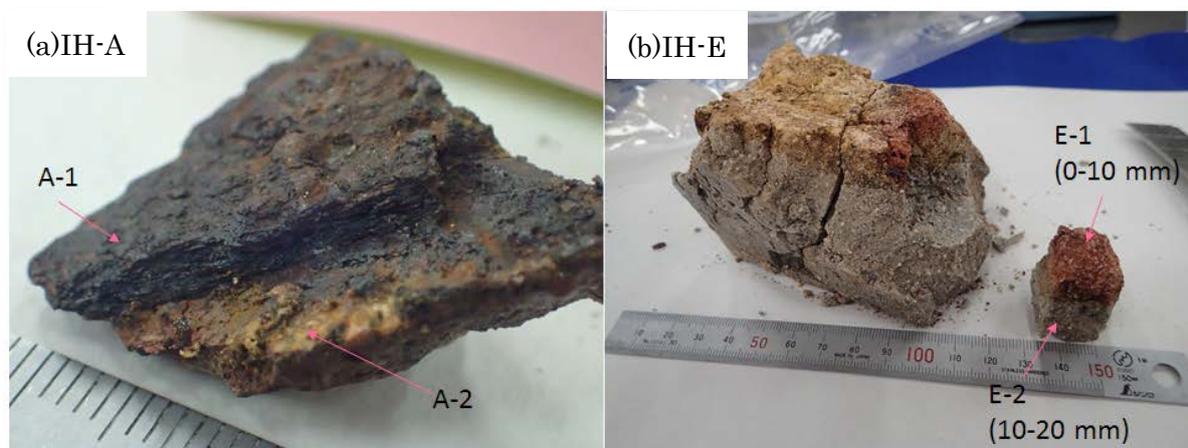


図 3.2.3-137 XRD 分析試料の概観(a: IH-A; b: IH-E)

a IH-A

IH-A 試料におけるマッピング結果 (20x20 mm) を図 3.2.3-138 に示す。上位 5 mm 程度は腐食した炭素鋼であり、そこは酸化物層となっている。Fe, Mn, Cr, Cu, Co, O, Cl に富むことから、基本的には炭素鋼の金属元素の酸化物と水酸化物(一部塩化物)で構成されていることがわかる。しかし炭素鋼由来の Ni だけはベントナイト接触境界部にのみ濃縮していて、同様の分布が Mg, Ca, Na に認められることから、これらはおそらく水酸化物もしくは炭酸塩として界面に選択的に沈殿したものと考えられる。Ca は界面から内部 10 mm 以上にわたって分布しており、S の分布と対応していることから石膏として沈殿していることがわかる。

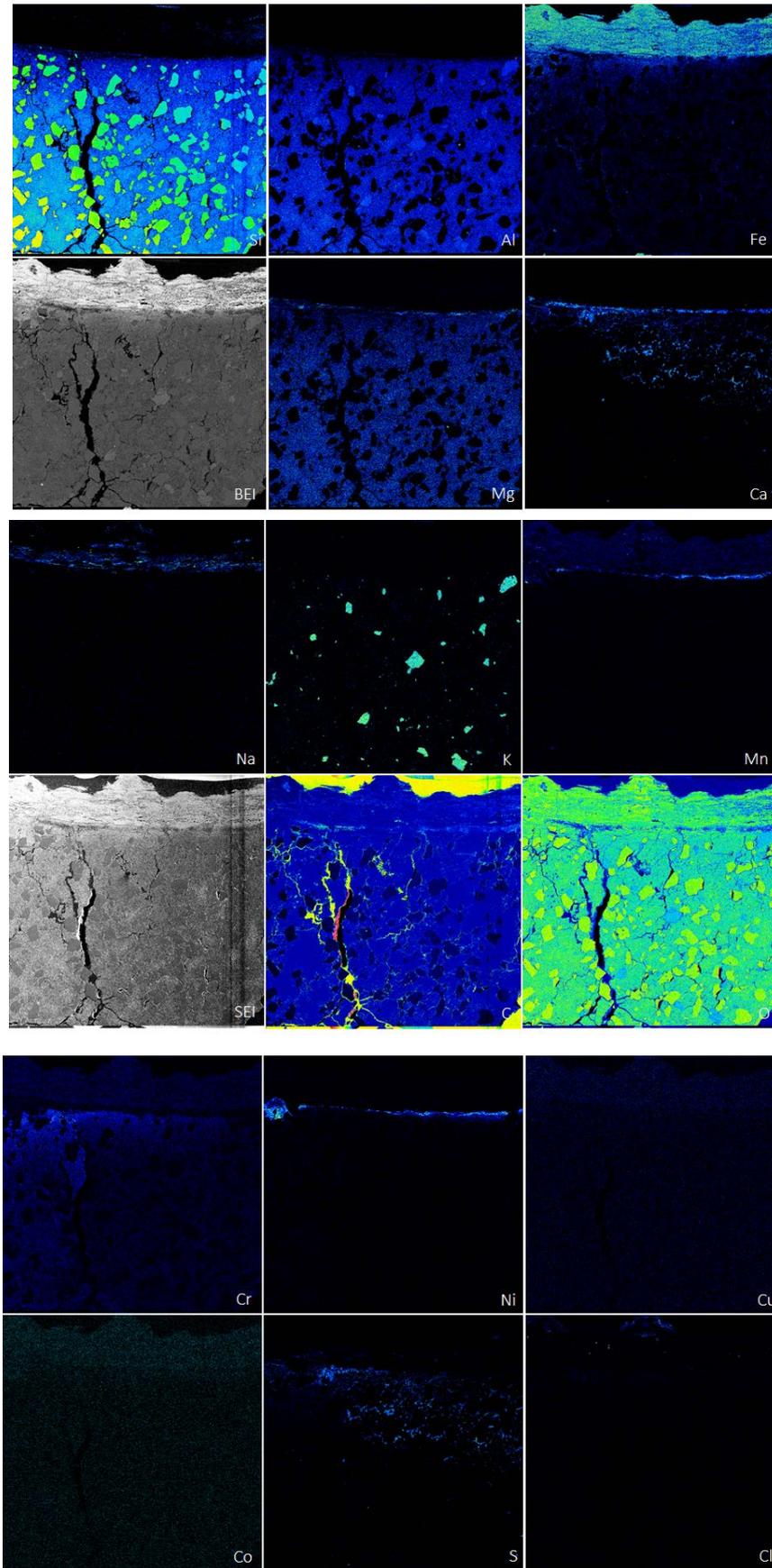


図 3.2.3-138 IH-A 試料の元素マッピング結果

b IH-D

IH-D 試料におけるマッピング結果を図 3.2.3-139 に示す。界面には Fe 濃縮ゾーンが数 mm 程度に発達しており、そこから内部 10 mm 程度までやや Fe に富む領域が確認できる。またそれよりも内部には不均質に Fe に富む脈状の濃縮領域があり、亀裂に伴って Fe を含んだ溶液が供給されていたと思われる。界面から内部 10-15 mm の領域には Ca に乏しい領域がはっきりと確認でき、亀裂の分布と関係があると思われる。つまり、内部には一旦石膏やカルサイトとして Ca が分布していたものが、亀裂の形成とともに移動していききた新たな溶液によって、これらの Ca 相は溶脱して失われているように見える。いずれにしても、接触界面からの Fe の供給とそれによる変質以外に、亀裂形成による溶液の供給パスの形成も、全体の変質規模支配する重要な要素であることは間違いない。この観察結果からは、Fe 変質界面は溶液供給パスとしては寄与していないと考えられる。

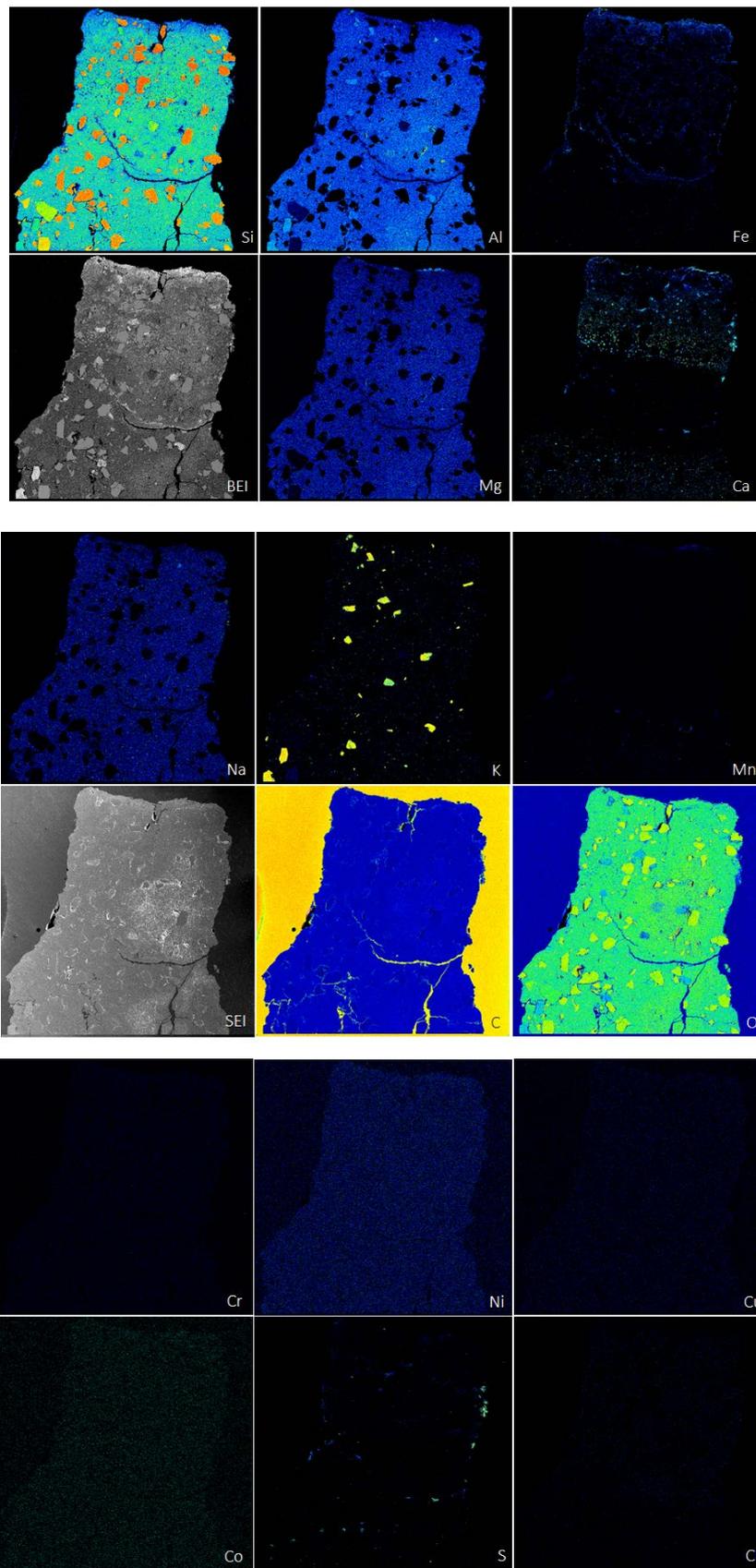


図 3.2.3-139 IH-D 試料の元素マッピング結果

c Fe プロファイル

以上の試料において、界面から内部のス멕タイトのスポット分析を行った。それらの Fe プロファイル(apfu)を図 3.2.3-140 に示す。下部試料の IH-A では炭素鋼の腐食が強く進行していて、実際のベントナイトの接触界面は、グラフ上は内部にシフトしている。最大の Fe 含有量は IH-D 試料の界面で認められ、これはス멕タイトではない可能性が大きい (鉄蛇紋石か緑泥石)。上位の IH-D 試料ではより内部に Fe 変質が及んでいるように見えるが、これには亀裂発達が関与していると思われる。

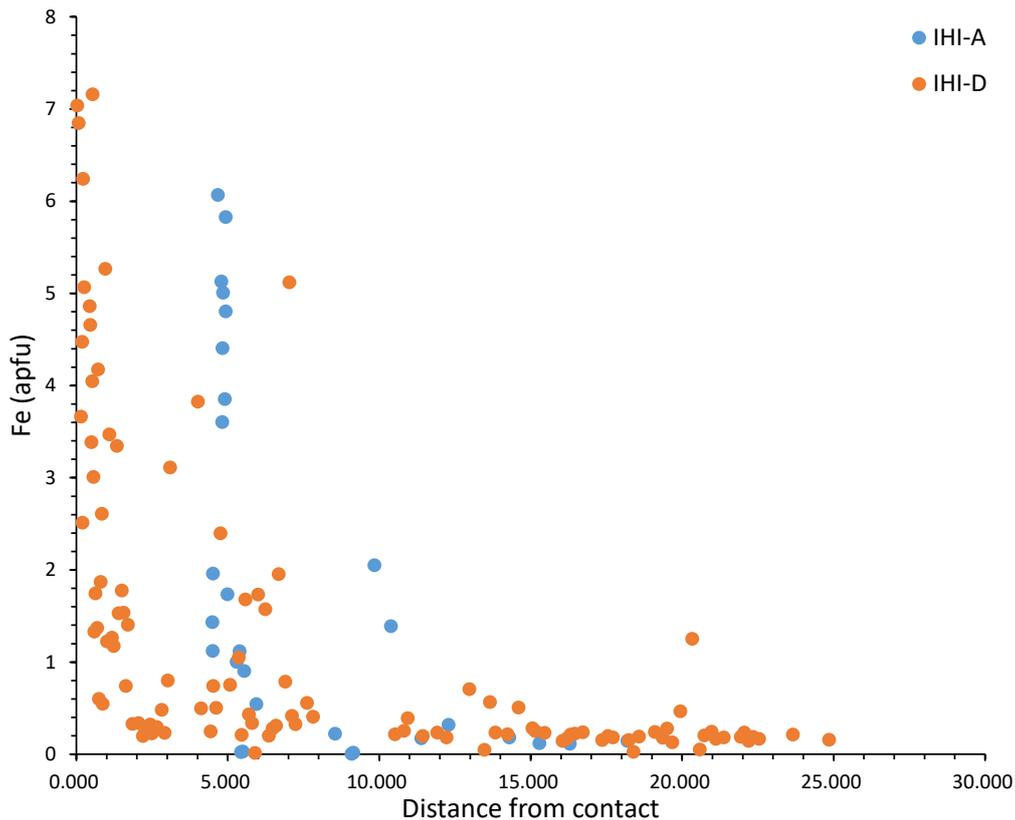
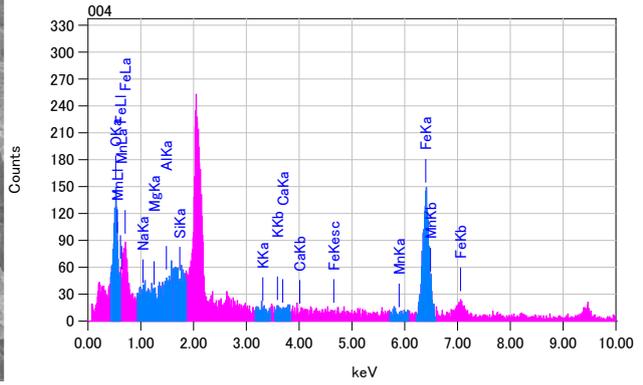
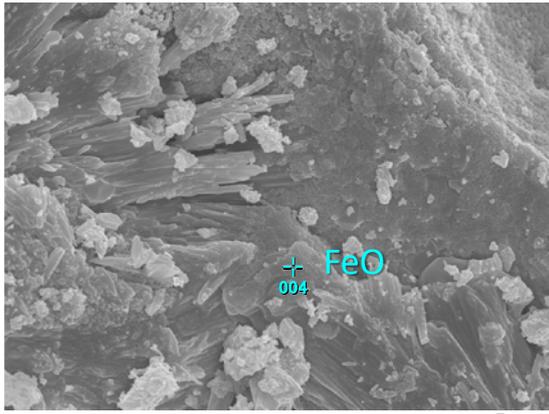


図 3.2.3-140 IH 室内試験試料のス멕タイトの Fe プロファイル(apfu)

3) FESEM 観察及び EDS 分析

a IH-4 試料

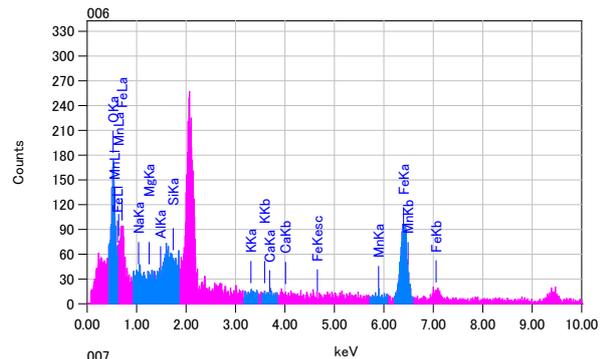
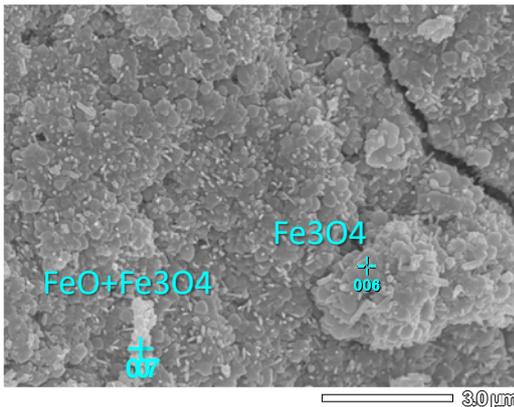
炭素鋼ヒーターブロックの下部からスクレイブした試料 IH-4 の FESEM-EDS 観察結果を以下に示す。表面はウスタイトと磁鉄鉱に覆われており、その上位に多様な鉄粘土鉱物が NaCl とともに生成していることから、これらの変質層は層状構造を持って、なおかつ溶液を保持する間隙が発達していることが予想される。比較的小規模な試験ではあるが、全体的に鉄の腐食が進行していて、なおかつ炭素鋼側の腐食界面は還元的な酸化物である FeO に富むことがわかる。



ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数 : 0.6617

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O K	0.525	17.19	0.42	41.27				24.4270
Na K	1.041	0.91	1.01	1.52				0.3385
Mg K	1.253	0.41	0.67	0.65				0.1611
Al K	1.486	0.32	0.56	0.46				0.1610
Si K								
K K	3.312	1.01	0.59	0.99				1.0317
Ca K								
Mn K								
Fe K	6.398	80.16	1.83	55.12				73.8806
合計		100.00		100.00				

図 3.2.3-141 Fe 酸化物の産状



ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数 : 0.6712

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O K	0.525	25.47	0.52	52.79				35.5082
Na K	1.041	3.07	1.20	4.43				1.1437
Mg K								
Al K								
Si K								
K K	3.312	0.61	0.73	0.52				0.6040
Ca K	3.690	0.75	0.95	0.62				0.7925
Mn K	5.894	1.76	2.11	1.06				1.5270
Fe K	6.398	68.35	2.28	40.58				60.4238
合計		100.00		100.00				

ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数 : 0.7736

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O K	0.525	15.63	0.92	36.32				23.4431
Na K	1.041	7.29	2.10	11.80				2.9590
Mg K								
Al K								
Si K	1.739	0.73	1.10	0.97				0.4885
K K	3.312	0.21	1.30	0.20				0.2258
Ca K	3.690	0.00	1.50	0.00				0.0031
Mn K	5.894	2.27	3.71	1.54				2.1413
Fe K	6.398	73.86	4.01	49.17				70.7392
合計		100.00		100.00				

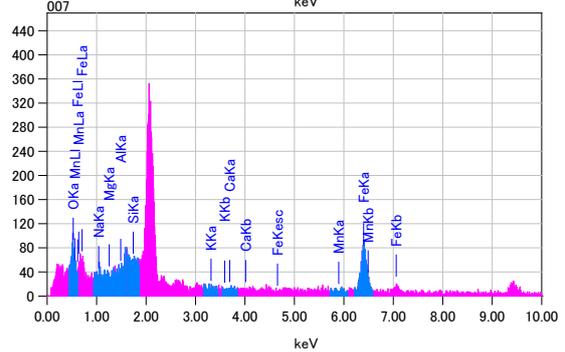
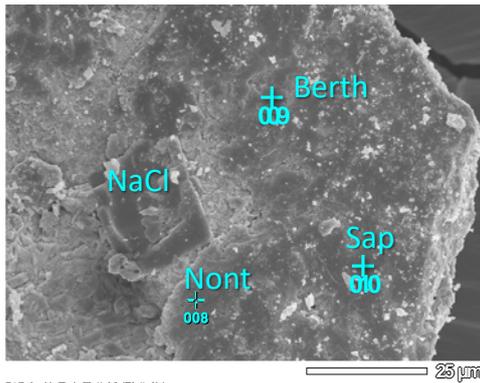


図 3.2.3-142 複数の微粒子状 Fe 酸化物の産状



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.5680
 全酸素数: 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		42.73						
Na K	1.041	2.39	0.81	3.37	Na2O	3.22	0.86	3.3228
Mg K	1.253	3.24	0.73	8.66	MgO	6.38	1.10	4.2761
Al K	1.486	7.08	0.78	8.51	Al2O3	13.38	2.16	10.7416
Si K	1.739	24.37	0.90	56.30	SiO2	52.12	7.15	41.2737
K K	3.312	2.38	0.75	1.98	K2O	2.87	0.50	5.1668
Ca K	3.690	1.01	1.01	1.63	CaO	1.41	0.21	2.3143
Mn K	5.894	0.57	2.28	0.68	MnO	0.74	0.09	1.1020
Fe K	6.398	16.24	2.46	18.87	FeO	20.89	2.39	31.8026
合計		100.00		100.00		100.00	14.45	

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.5900
 全酸素数: 14.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		35.35						
Na K	1.041	1.34	0.97	1.99	Na2O	1.81	0.37	1.2650
Mg K	1.253	1.33	0.83	3.75	MgO	2.21	0.35	1.2623
Al K	1.486	6.06	0.83	7.68	Al2O3	11.44	1.42	7.0019
Si K	1.739	14.73	0.92	35.90	SiO2	31.51	3.32	19.8654
K K	3.312	1.38	0.70	1.21	K2O	1.67	0.22	2.5185
Ca K	3.690	1.31	0.94	2.23	CaO	1.83	0.21	2.6268
Mn K	5.894	1.75	2.14	2.18	MnO	2.26	0.20	2.9287
Fe K	6.398	36.74	2.31	45.04	FeO	47.27	4.17	62.4314
合計		100.00		100.00		100.00	10.26	

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.6525
 全酸素数: 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		42.06						
Na K	1.041	2.99	0.97	4.25	Na2O	4.03	1.09	3.9843
Mg K	1.253	2.34	0.89	6.29	MgO	3.88	0.80	2.9578
Al K	1.486	7.60	0.92	9.21	Al2O3	14.36	2.36	11.2687
Si K	1.739	23.00	1.07	53.57	SiO2	49.20	6.85	38.0943
K K								
Ca K	3.690	1.93	1.16	3.16	CaO	2.70	0.40	4.4627
Mn K								
Fe K	6.398	20.08	2.85	23.52	FeO	25.83	3.01	39.2322
合計		100.00		100.00		100.00	14.51	

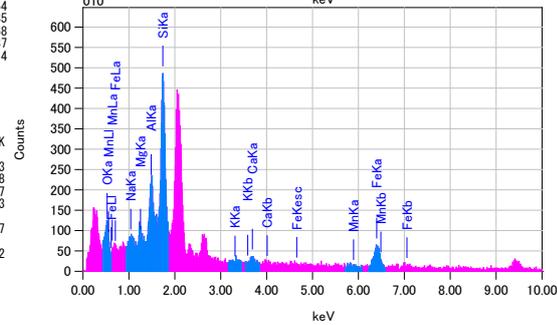
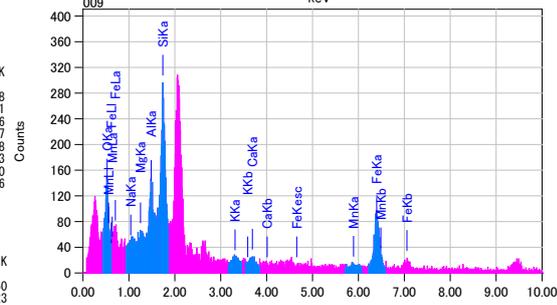
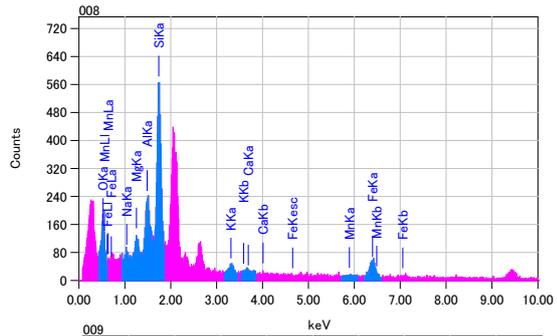
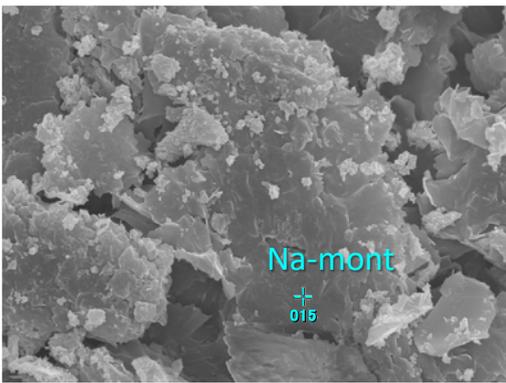


図 3.2.3-143 多様な Fe 変質鉱物と NaCl



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.5329
 全酸素数: 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		49.51						
Na K	1.041	2.48	0.55	3.54	Na2O	3.34	0.77	4.7681
Mg K	1.253	1.78	0.52	4.80	MgO	2.95	0.52	3.0974
Al K	1.486	12.42	0.57	15.10	Al2O3	23.47	3.27	24.3603
Si K	1.739	31.46	0.72	73.46	SiO2	67.30	7.96	62.5181
Cl K	2.621	0.39	0.40	0.73	Cl	0.39	0.00	0.8722
K K	3.312	0.07	0.64	0.05	K2O	0.08	0.01	0.1562
Ca K	3.690	0.22	0.85	0.36	CaO	0.31	0.04	0.5664
Mn K								
Fe K	6.398	1.67	2.07	1.96	FeO	2.15	0.21	3.6612
合計		100.00		100.00		100.00	12.79	

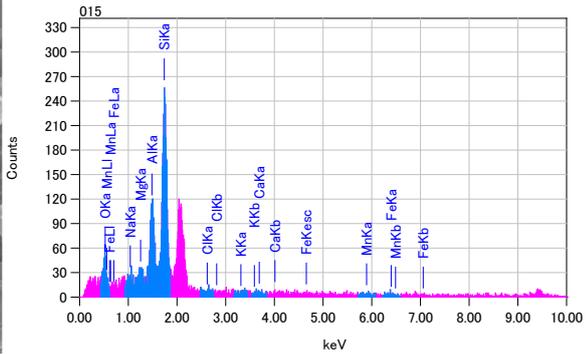
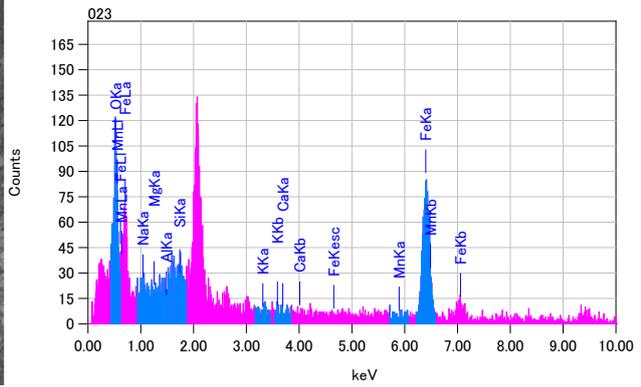
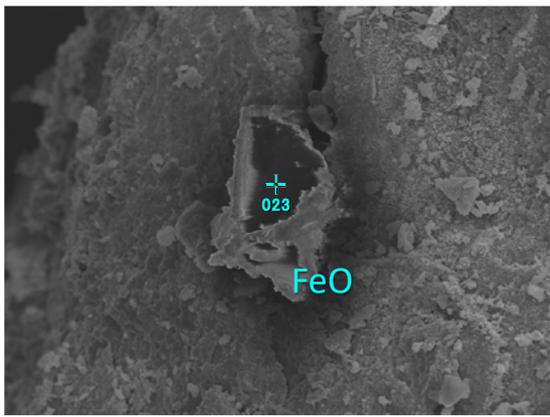
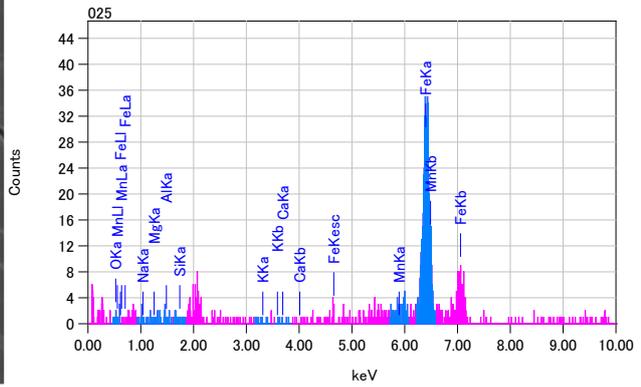
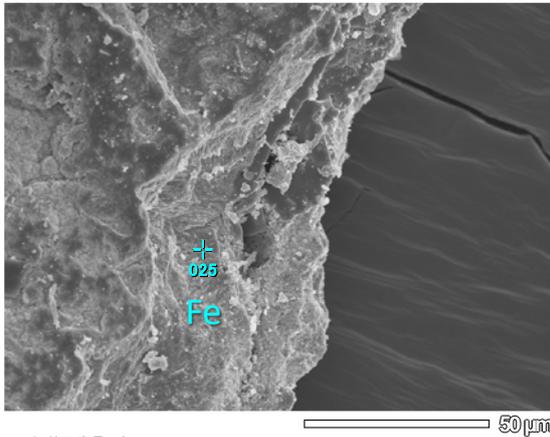


図 3.2.3-144 未変質のままのモンモリロナイト



ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数 : 0.6376

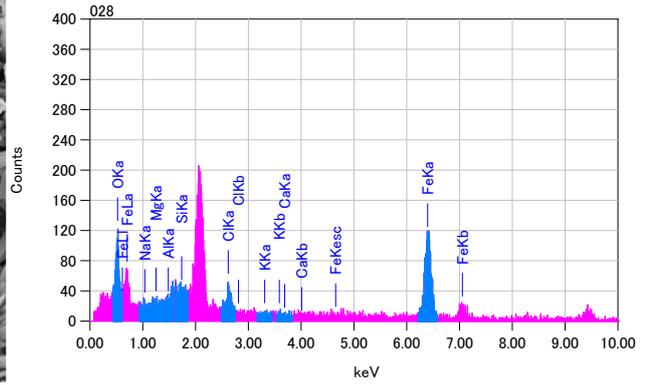
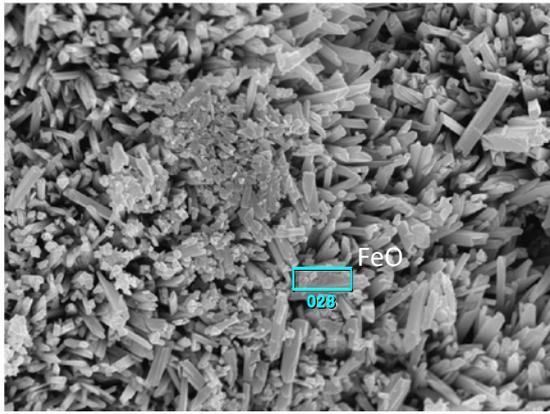
元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	22.12	0.34	47.49				31.7432
Na	1.041	4.23	0.81	6.33				1.6260
Mg								
Al								
Si	1.739	1.13	0.41	1.38				0.7303
K	3.312	0.66	0.50	0.58				0.6659
Ca								
Mn	5.894	1.35	1.43	0.84				1.2012
Fe	6.398	70.52	1.55	43.38				64.0335
合計		100.00		100.00				



ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数 : 0.6134

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	0.65	0.19	2.21				0.9789
Na	1.041	0.45	0.45	1.05				0.1723
Mg								
Al								
Si	1.486	0.56	0.25	1.13				0.2941
K								
Ca								
Mn	5.894	2.39	0.73	2.36				2.3529
Fe	6.398	95.95	0.79	93.25				96.2018
合計		100.00		100.00				

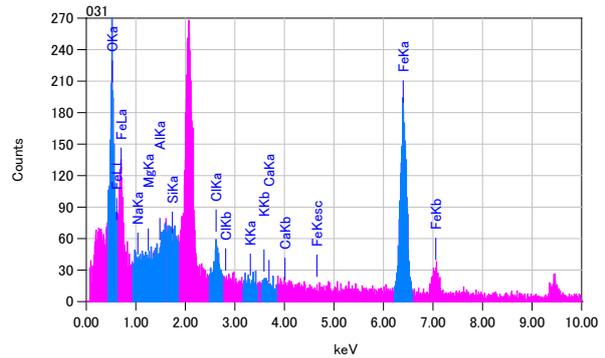
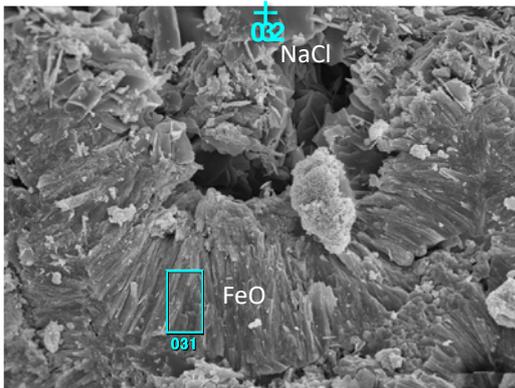
図 3.2.3-145 Fe 酸化物と金属鉄



ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数 : 0.5858

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	17.46	0.38	40.59				23.7115
Na	1.041	1.96	0.82	3.17				0.7749
Mg	1.253	0.38	0.55	0.58				0.1542
Al								
Si	1.739	0.85	0.41	1.12				0.5691
Cl	2.621	4.08	0.37	4.29				4.0285
K	3.312	0.34	0.50	0.33				0.3551
Ca								
Fe	6.398	74.93	1.55	49.92				70.4068
合計		100.00		100.00				

図 3.2.3-146 FeO の微結晶



ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数 : 0.5552

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	21.86	0.32	48.69				30.1868
Na								0.2386
Mg	1.253	0.61	0.51	0.90				
Al								
Si	2.621	2.51	0.34	2.53				2.3692
Cl								
K								
Ca								
Fe	6.398	75.02	1.43	47.88				67.2054
合計		100.00		100.00				

ZAF法 簡易定量分析
 フィッティング係数 : 0.3399

元素	(keV)	質量%	誤差%	原子数%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	0.525	4.97	0.70	9.24				3.2374
Na	1.041	32.23	0.32	41.69				28.7389
Mg								
Al								
Si	1.739	0.15	0.29	0.15				0.1217
Cl	2.621	50.77	0.29	42.59				56.5690
K								
Ca								
Fe	6.398	11.88	1.36	6.33				11.3331
合計		100.00		100.00				

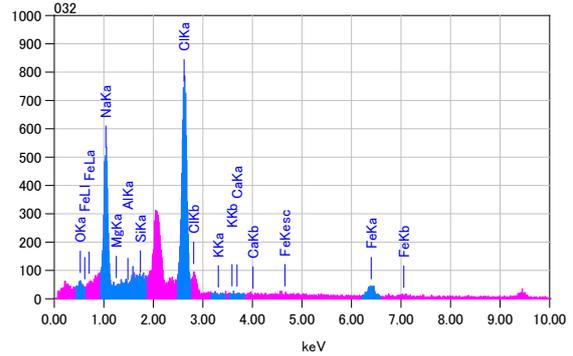


図 3.2.3-147 NaCl と共存する FeO

b IH-A

炭素鋼ヒーターブロック接触ベントナイトのセル内下部試料 IH-A は炭素鋼腐食界面から外側に発達する比較的厚い腐食生成物層で構成されている。炭素鋼界面から溶出した Fe 成分が堆積して形成されたと考えられるが、非常に脆くて、外側を覆うベントナイト成分はほとんど含まれていない。その FESEM-EDS 観察結果を以下に示す。金属鉄の上に FeO (ウスタイト) とその上に Fe を含んだ石膏の成長が認められる。

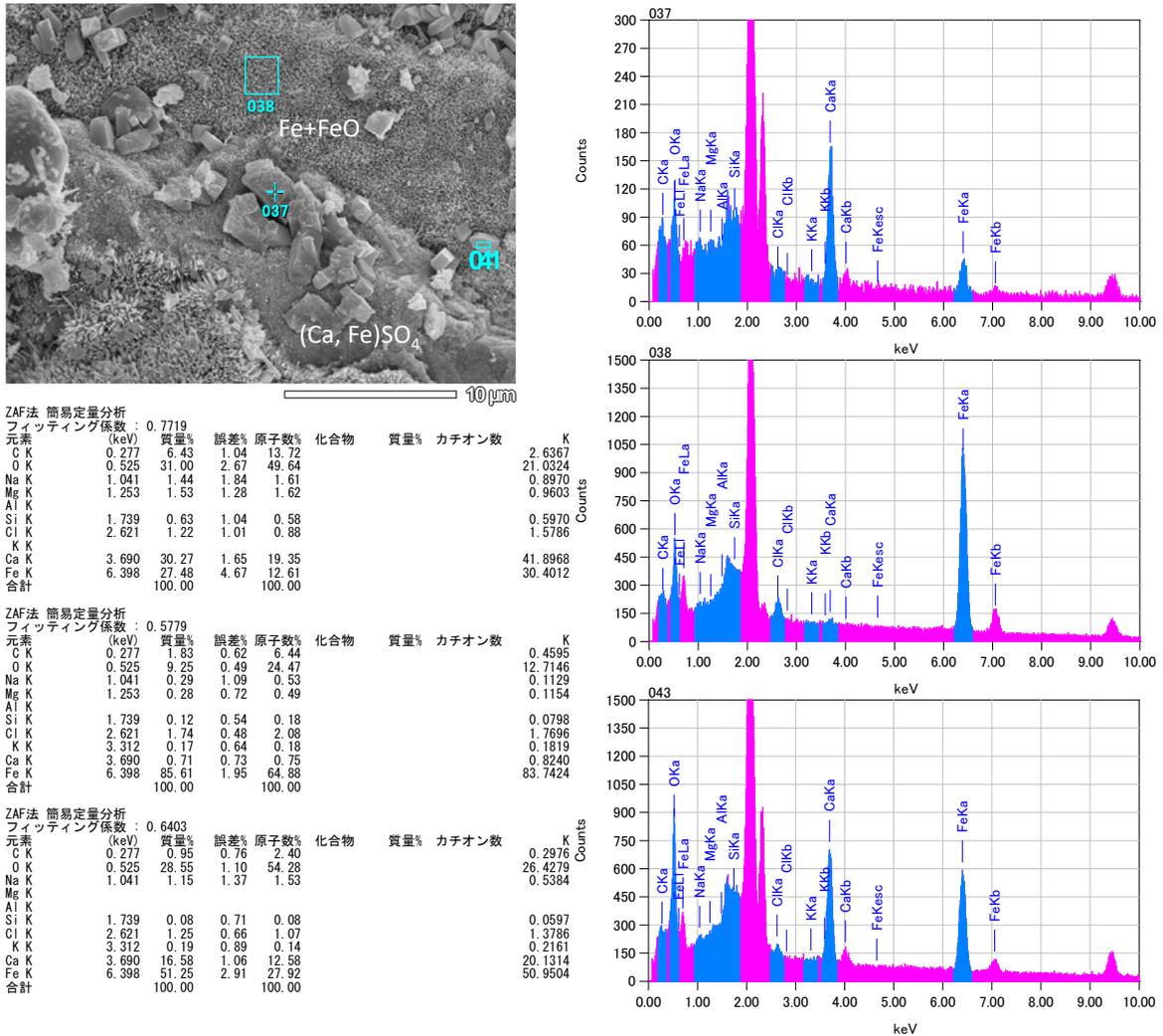


図 3.2.3-148 金属鉄とその上に成長する微細な FeO と Fe を含む石膏

c IH-B

IH-A よりも上位の試料 IH-B の炭素鋼接触部の FESEM-EDS 観察結果を示す。

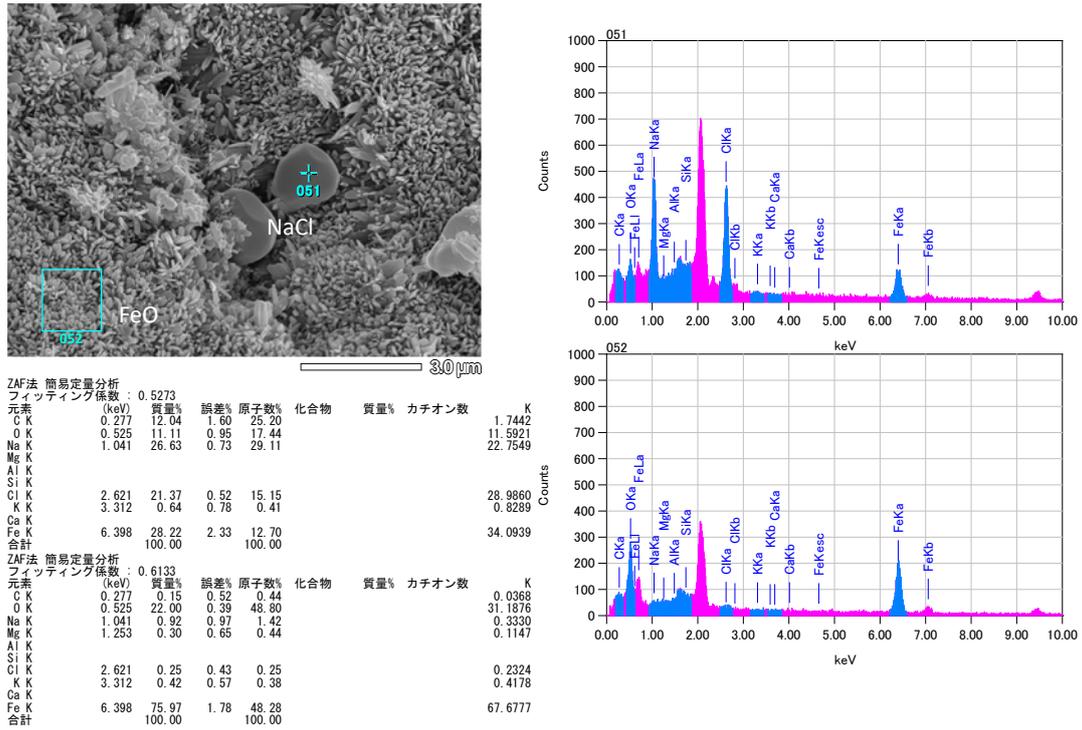


図 3.2.3-149 FeO と共存する NaCl

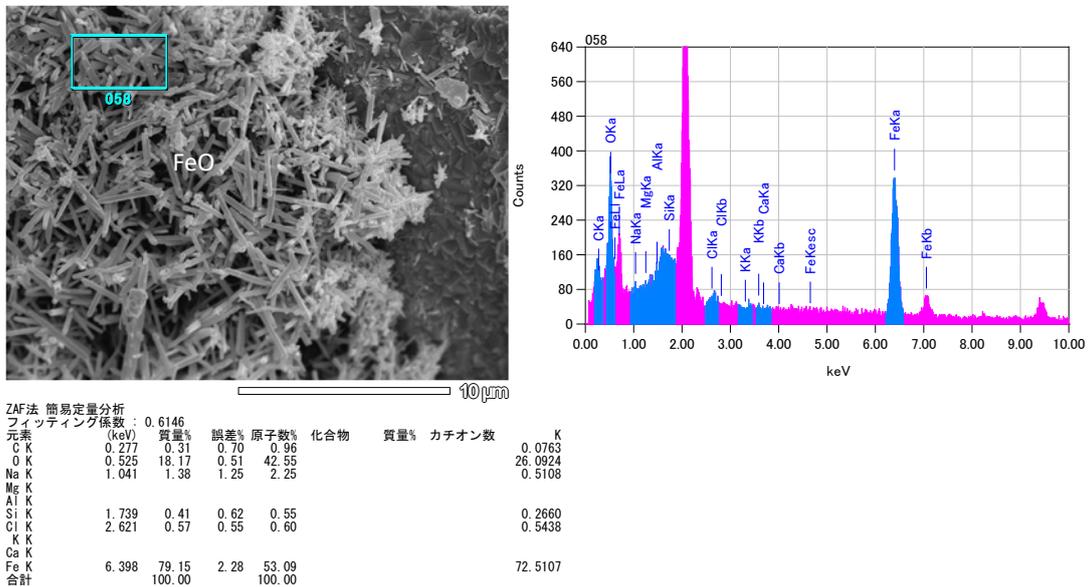


図 3.2.3-150 FeO の微結晶

d IH-C

IH-B よりも上位にある IH-C 試料の FESEM-EDS 観察結果を以下に示す。炭素鋼接触界面にスメクタイトが多く見られ、それらの多くはノントロナイト組成を示し、内部に微細な FeO 粒子を伴っている。またシリカやシリカに富むクリノプチロライト質ゼオライトも多い。

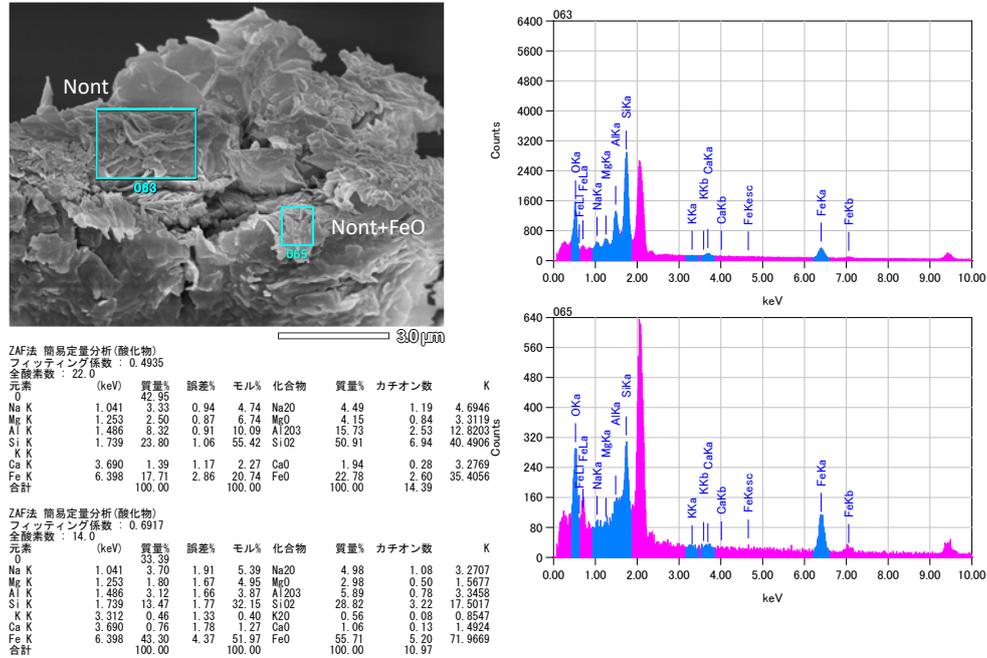


図 3.2.3-151 微細な FeO と共存するノントロナイト

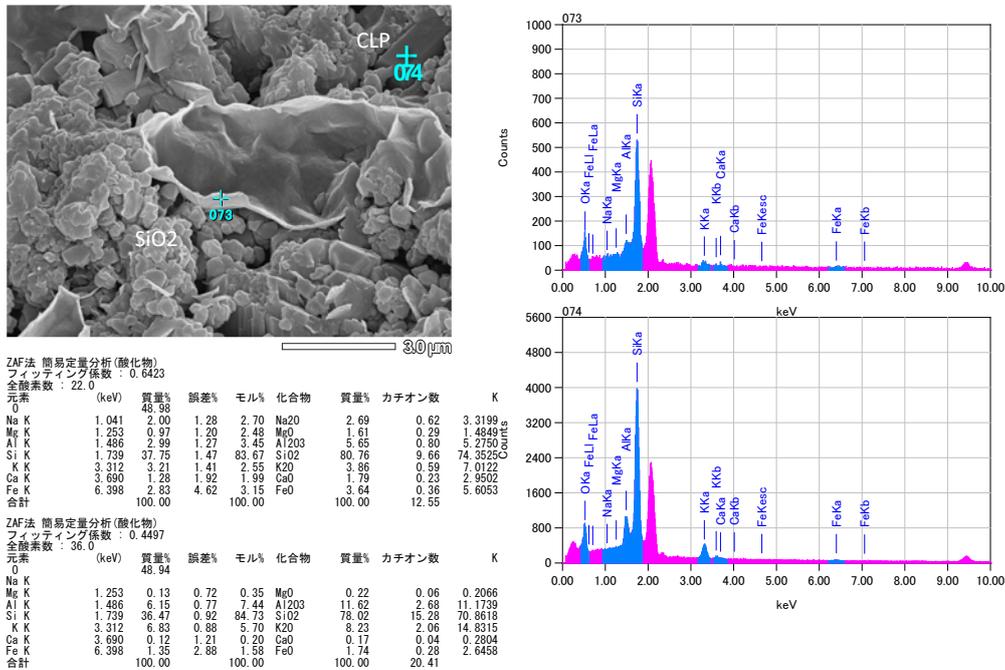


図 3.2.3-152 SiO2 と共存するクリノプチロライト質ゼオライト

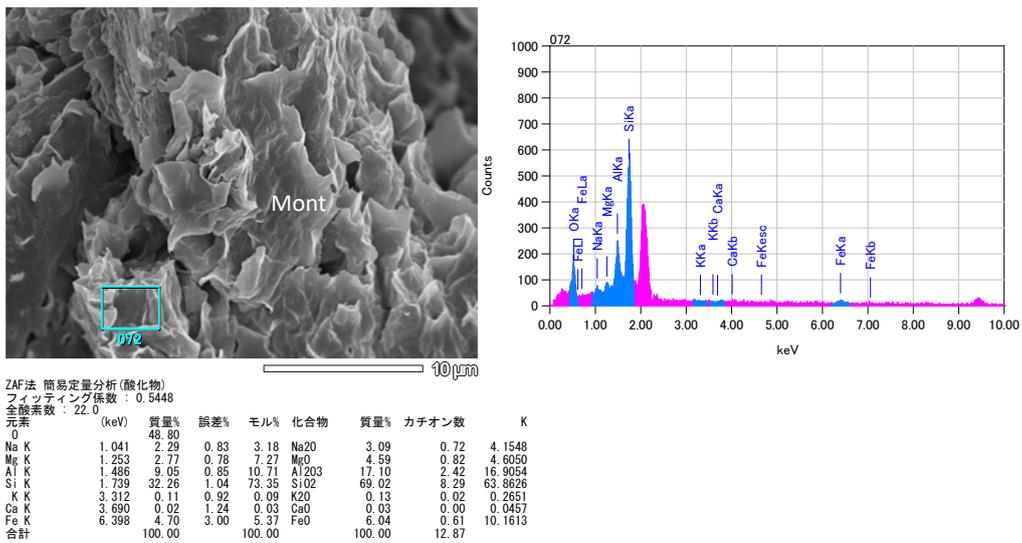


図 3.2.3-153 未変質のままのモンモリロナイト

e IH-D

IH-D 試料の FESEM-EDS 観察結果を以下に示す。さらに上位の試料では炭素鋼接触界面には Fe を含んだカルサイトと石膏が認められる。

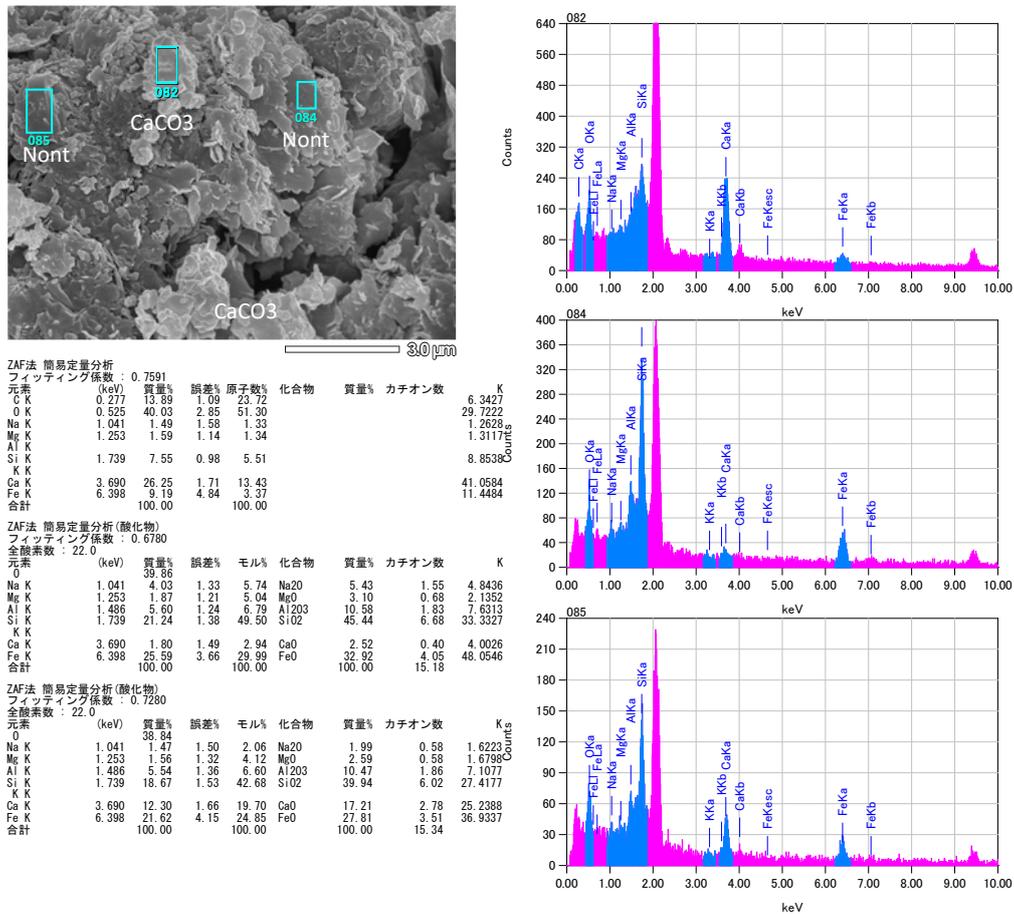
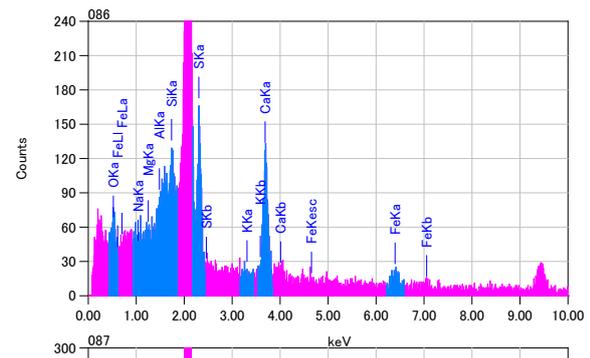
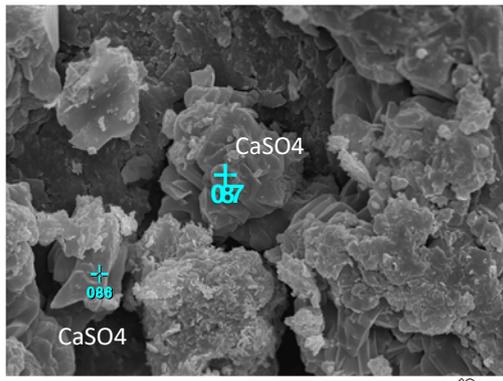
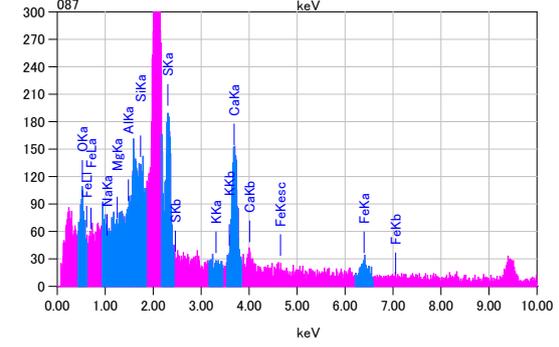


図 3.2.3-154 ノントロナイトと Fe を含むカルサイト



ZAF法 簡易定量分析 (酸化物)
 フィッティング係数 : 0.7288
 全酸素数 : 24.0

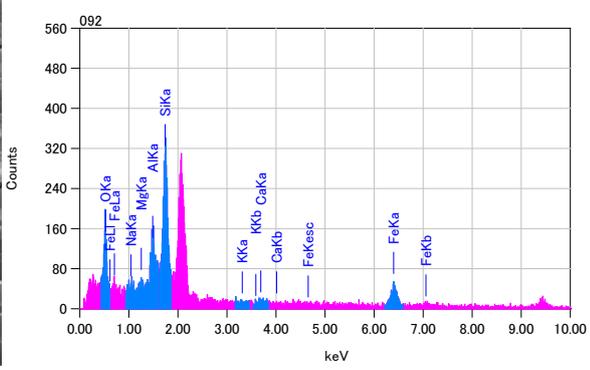
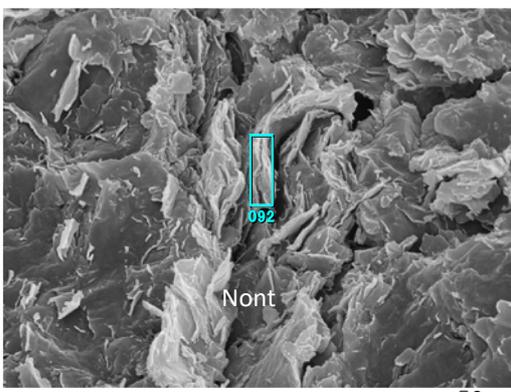
元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		45.03						
Na K								
Mg K	1.253	0.45	1.36	1.25	MgO	0.75	0.16	0.4920
Al K	1.486	0.34	1.40	0.42	Al2O3	0.63	0.11	0.4368
Si K	1.739	4.93	1.51	11.86	SiO2	10.56	1.50	7.6482
S K	2.307	18.36	1.65	38.65	SO3	45.84	4.88	34.3906
Ca K	3.690	22.04	1.84	37.13	CaO	30.84	4.69	42.7910
Fe K	6.398	8.84	4.59	10.69	FeO	11.37	1.35	14.2414
合計		100.00		100.00		100.00	12.68	



ZAF法 簡易定量分析 (酸化物)
 フィッティング係数 : 0.7272
 全酸素数 : 24.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		44.41						
Na K								
Mg K								
Al K	1.486	0.05	1.53	0.07	Al2O3	0.10	0.02	0.0652
Si K	1.739	1.68	1.65	4.12	SiO2	3.60	0.52	2.5176
S K	2.307	20.16	1.75	43.17	SO3	50.34	5.44	37.3035
K K	3.312	0.26	1.45	0.23	K2O	0.31	0.06	0.4727
Ca K	3.690	23.40	2.00	40.08	CaO	32.74	5.03	44.0028
Fe K	6.398	10.03	4.99	12.33	FeO	12.90	1.55	15.6383
合計		100.00		100.00		100.00	12.63	

図 3.2.3-155 Fe を含む石膏の産状



ZAF法 簡易定量分析 (酸化物)
 フィッティング係数 : 0.5868
 全酸素数 : 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		41.93						
Na K	1.041	1.73	0.98	2.48	Na2O	2.33	0.63	2.2289
Mg K	1.253	2.19	0.88	5.94	MgO	3.63	0.76	2.7336
Al K	1.486	7.52	0.91	9.18	Al2O3	14.20	2.34	11.0281
Si K	1.739	23.16	1.05	54.35	SiO2	49.55	6.92	38.0362
K K	3.312	0.18	0.85	0.15	K2O	0.22	0.04	0.3905
Ca K	3.690	0.87	1.15	1.43	CaO	1.22	0.18	1.9908
Fe K	6.398	22.42	2.80	26.46	FeO	28.84	3.37	43.5919
合計		100.00		100.00		100.00	14.24	

図 3.2.3-156 ノントロナイトの産状

f IH-E

炭素鋼ヒーターブロック接触ベントナイトのセル内最上部試料 IH-E の FESEM-EDS 観察結果を以下に示す。ベントナイトの初生鉱物がよく保存されている。

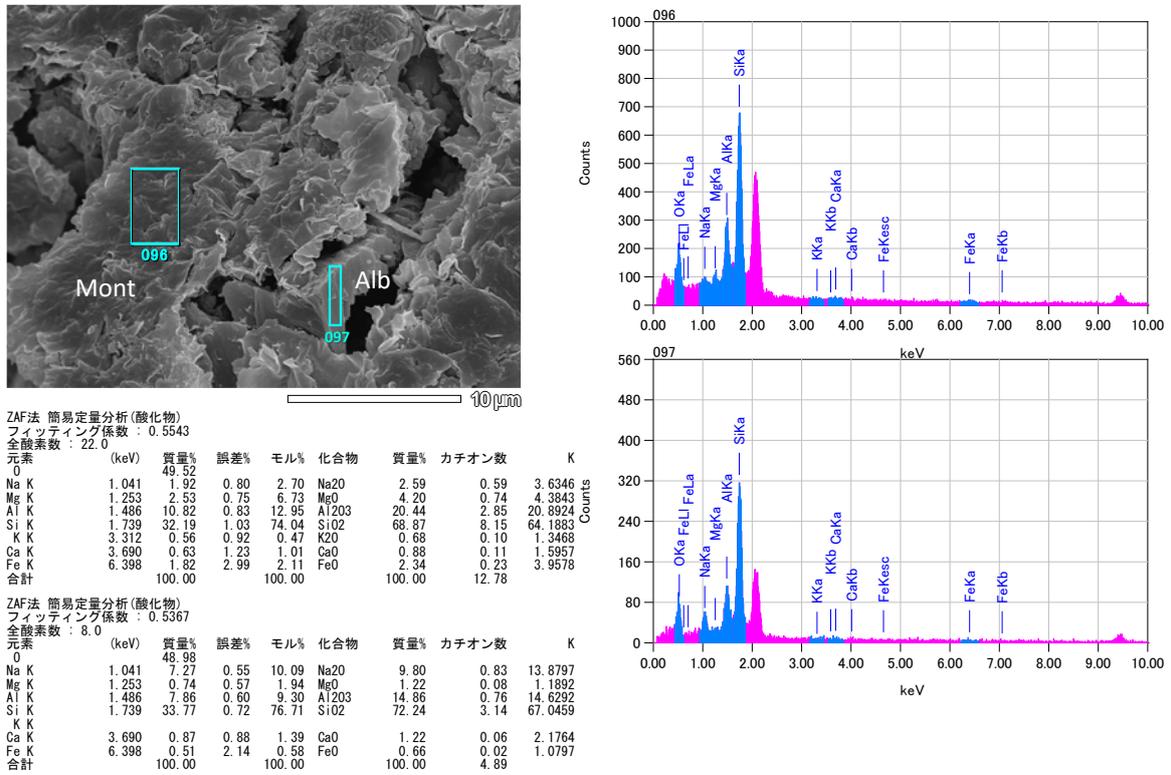


図 3.2.3-157 未変質のままのモンモリロナイトと随伴鉱物のアルバイト

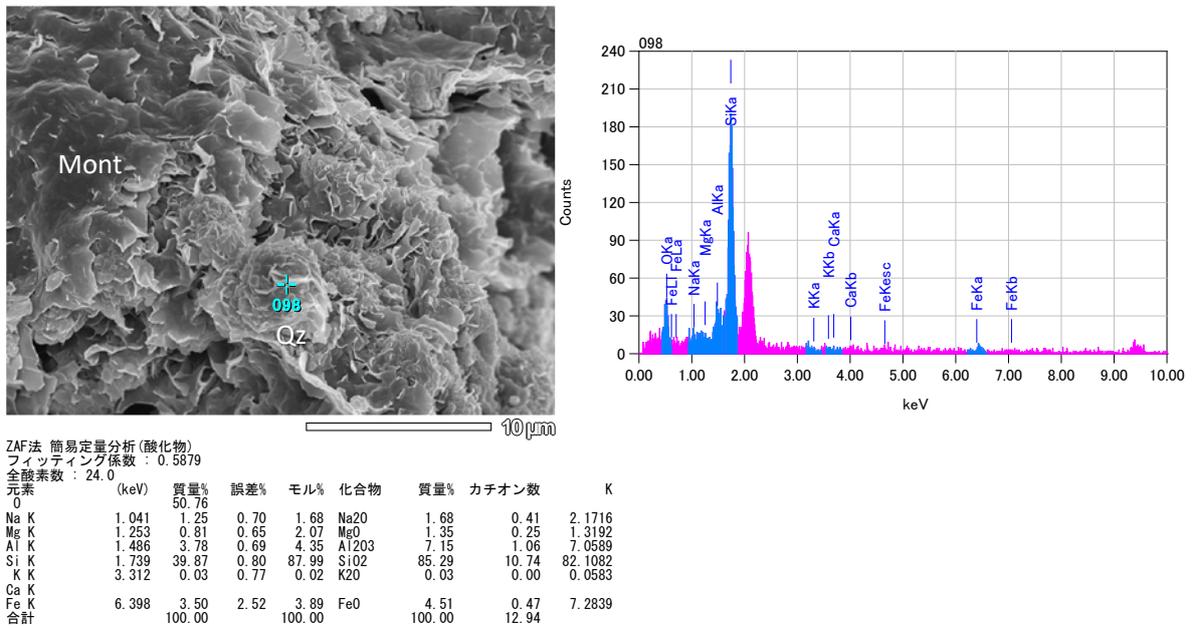


図 3.2.3-158 モンモリロナイトの随伴鉱物のシリカ

g IH-block 試料

参照試料として、未変質の出発ベントナイトブロック試料（初期試料）の FESEM-EDS 観察結果を以下に示す。クニゲル V1 に含まれる典型的な Na モンモリロナイトの組成を示している。

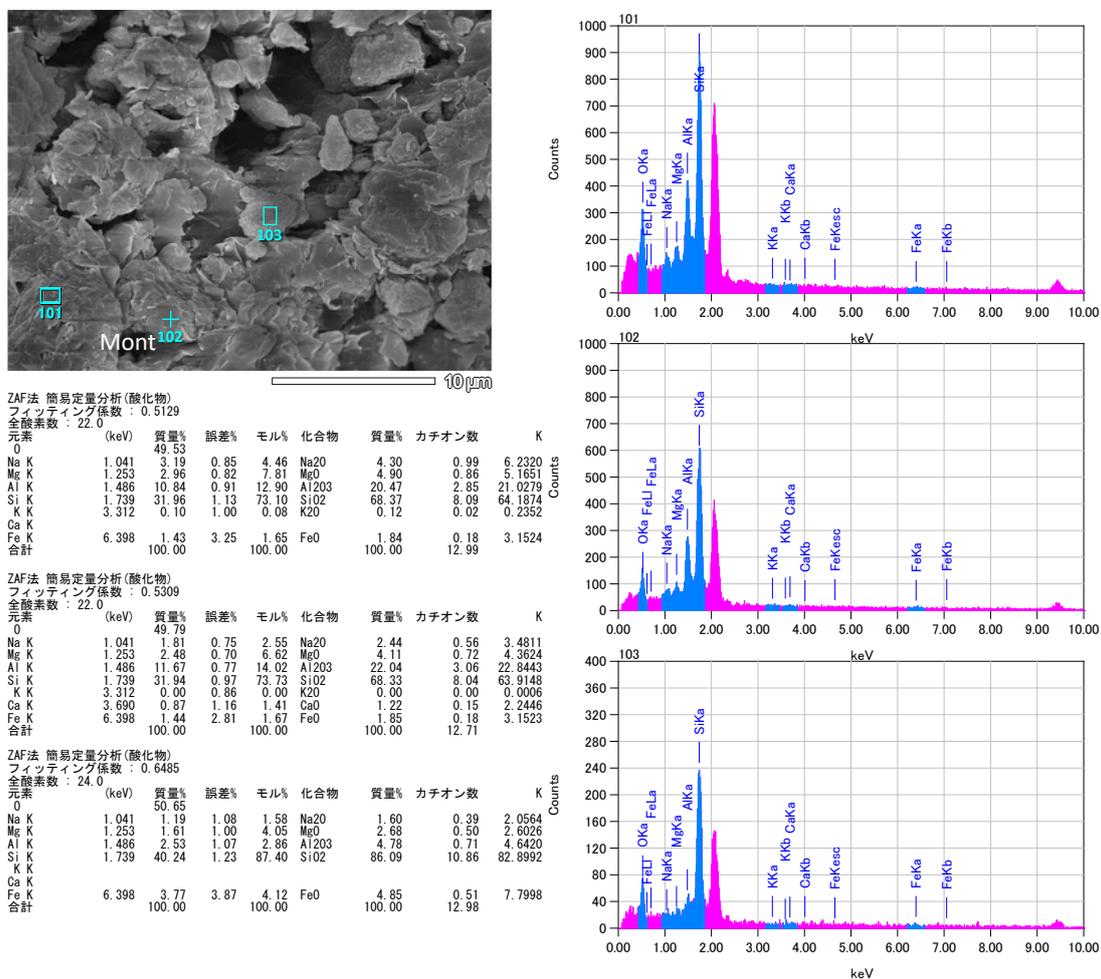


図 3.2.3-159 初期ベントナイトブロック試料

4) XRD 分析

完全不定法位処理を行ったベントナイト試料の測定を行い、モンモリロナイトの層間距離の変化の評価、あるいはリートベルト解析によって変質割合を評価した。真空乾燥した試料から切り出した試料において、従来法の XRD 測定を実施した。試料は完全不定法位処理を行ってある。各試料の XRD 測定結果を以下に示す。出発試料のベントナイトにはモンモリロナイト、クリノプチロライト、カルサイト、石英、アルバイト、サニディンが含まれている(図 3.2.3-160)。

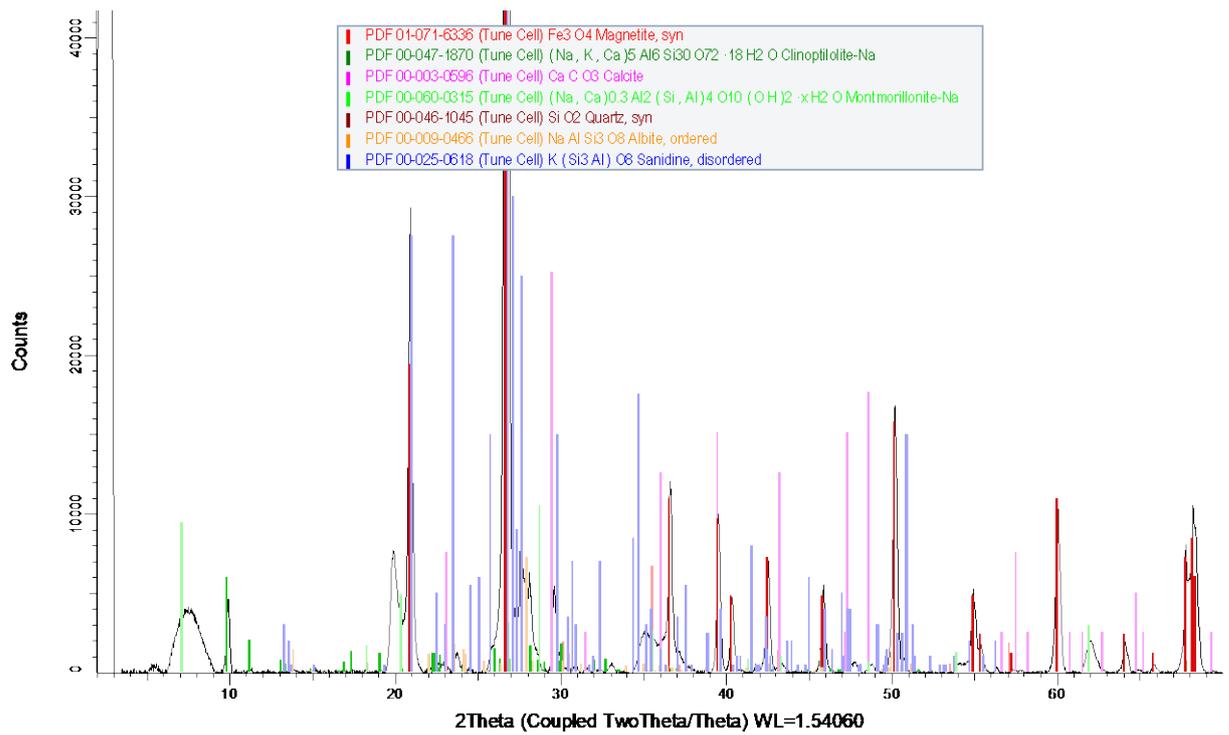


図 3.2.3-160 IH 試験の出発ベントナイト試料の XRD パターン

炭素鋼接触試料のうち、最も激しく変質している IH-A 試料の XRD 測定結果を図 3.2.3-161 と図 3.2.3-162 に示す。

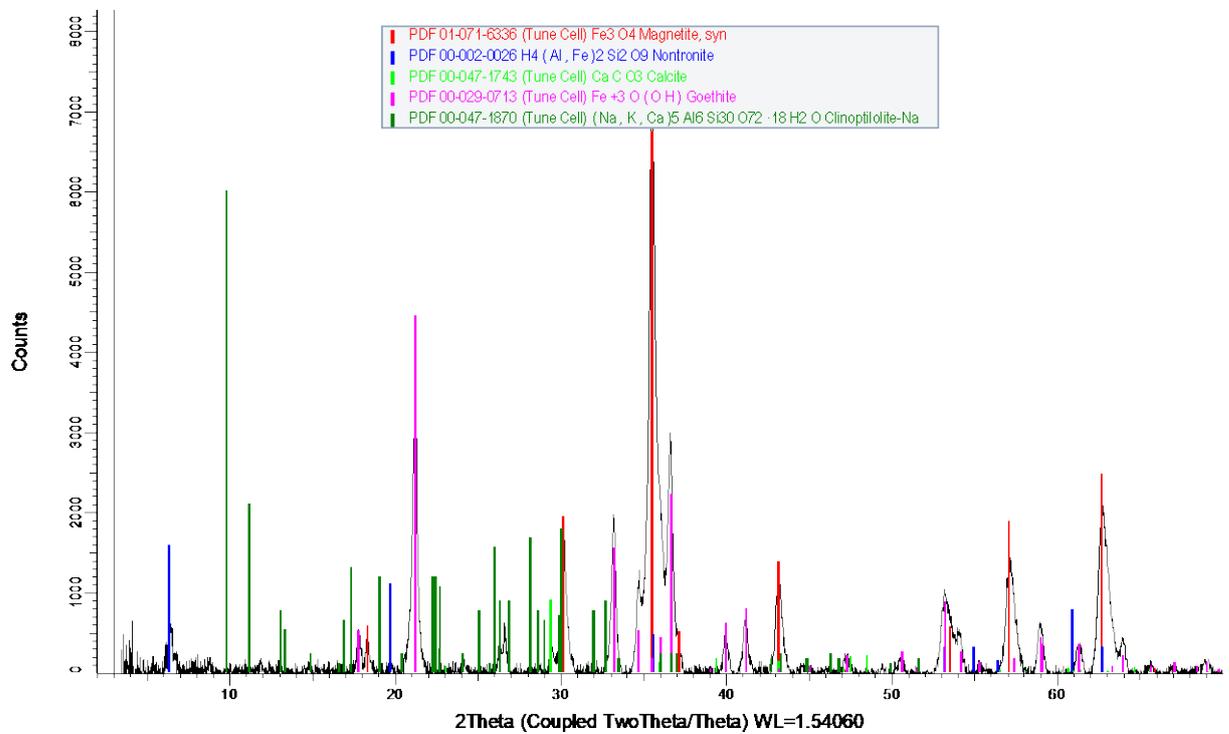


図 3.2.3-161 IH-A-1 試料の XRD パターン

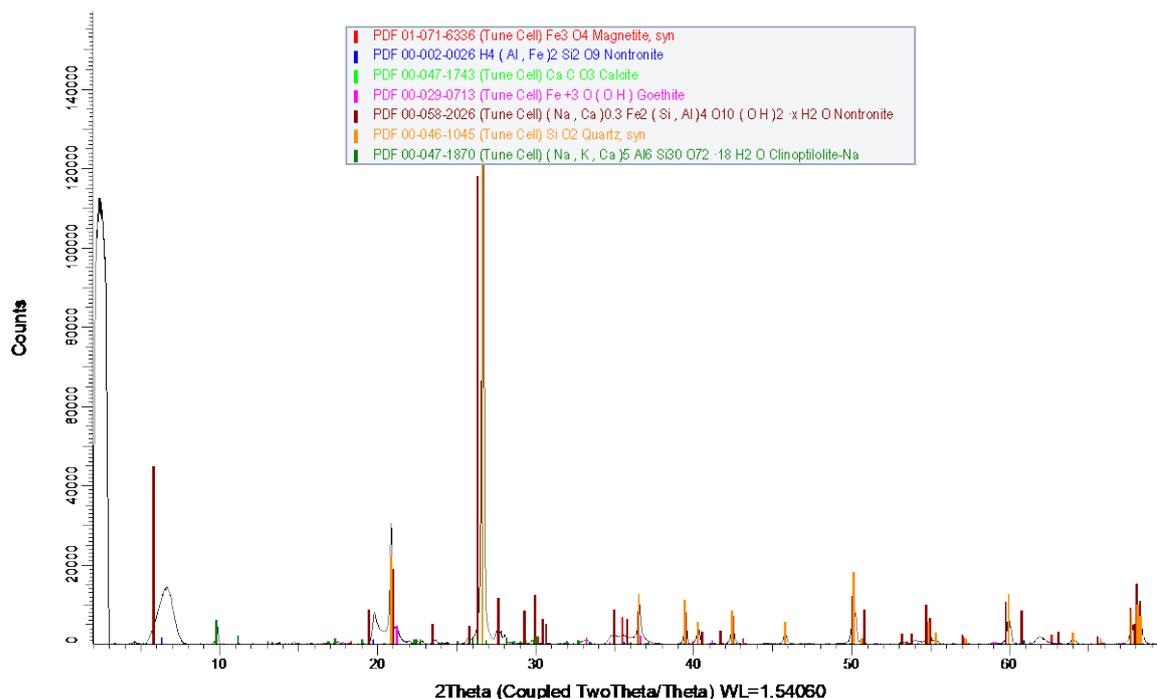


図 3.2.3-162 IH-A-2 試料の XRD パターン

反応容器の底部から回収されたこの界面(IH-A-1)試料は、主要なピークがマグネタイトとゲーサイトであることから炭素鋼が腐食した部位であることがわかる。これと密に付着した部分には黄褐色化したベントナイトがあり、構成スメクタイトはノントロナイトにアサインされるものである。その他として少量のカルサイトと元々随伴鉱物として含まれていたクリノプチロライトが検出された。上位試料の IH-E について図 3.2.3-163 と図 3.2.3-164 に示す。

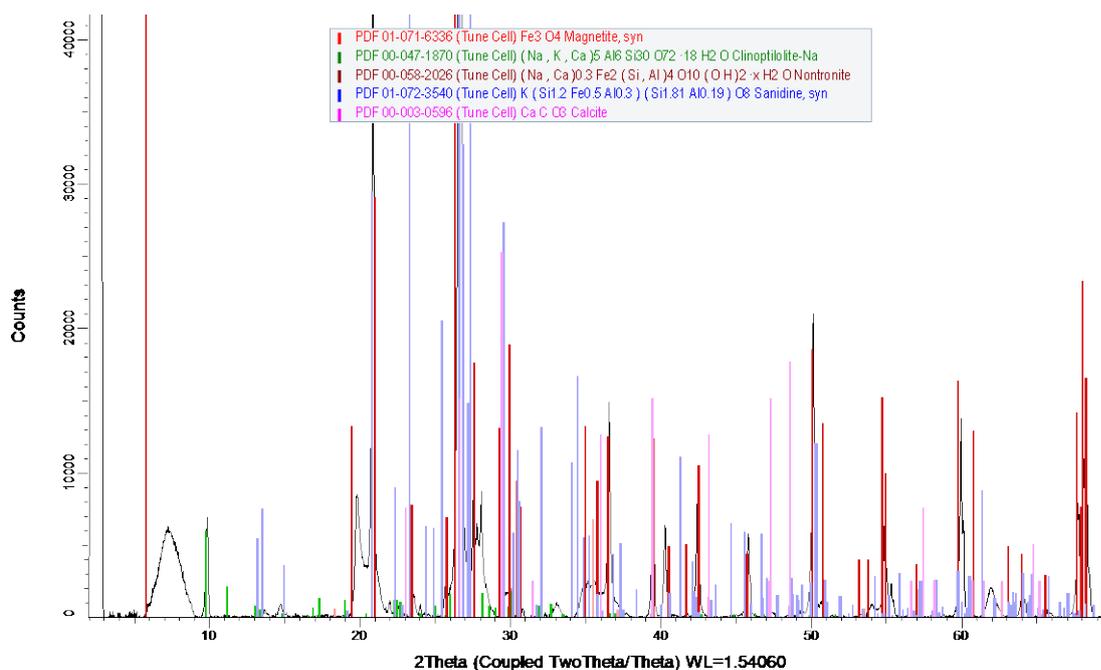


図 3.2.3-163 IH-E-1 試料の XRD パターン

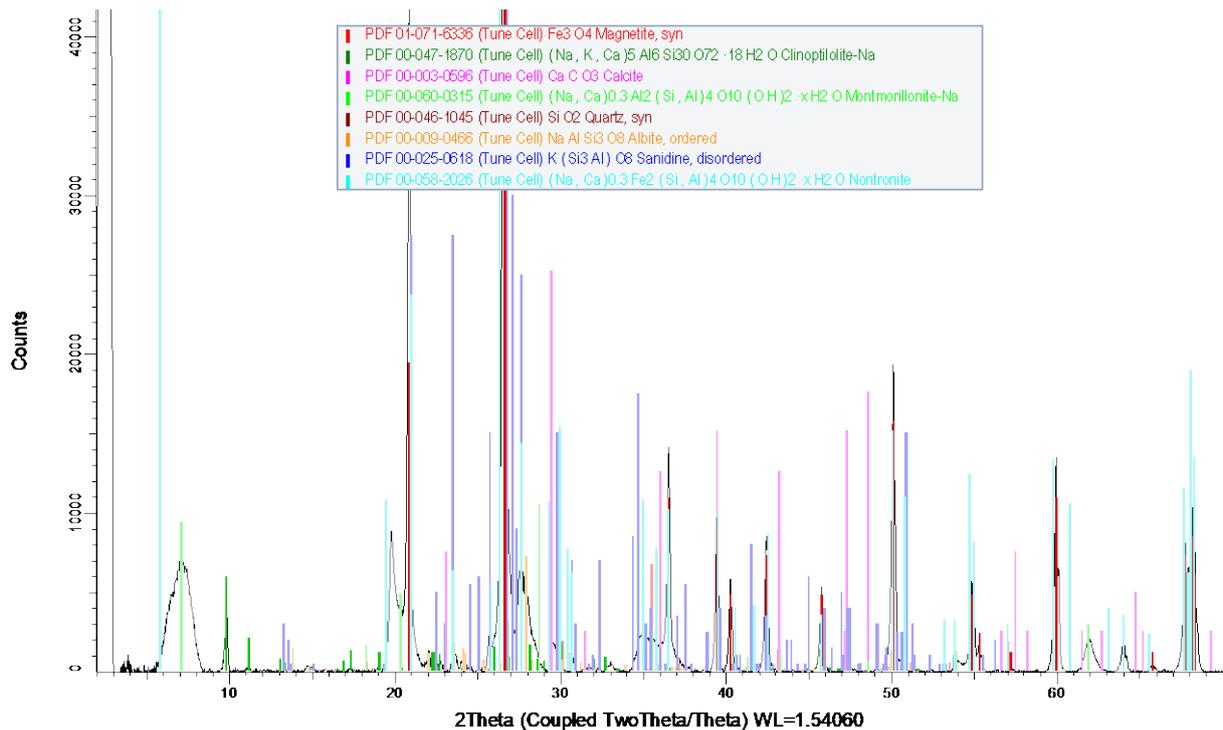


図 3.2.3-164 IH-E-2 試料の XRD パターン

炭素鋼接触部の IH-E-1 試料では、マグネタイトが多く、スメクタイトはノントロナイトであるが、界面から離れた IH-E-2 試料では、スメクタイトはモンモリロナイトとノントロナイトで構成されており、初期の多くの構成鉱物が未変質で残存していることがわかる。

これらの回折ピークをリートベルト解析ソフト(Bulker, TOPAS)を用いて変質量を定量評価した。結果を以下に示す。腐食界面の構成鉱物は水酸化鉄と磁鉄鉱で構成されており、そこにノントロナイトが加わっていることがわかる。その内側のベントナイトには石膏が析出しており、解析では 7 wt.% の量を示した。主要成分の石英は 60 wt.% にも及ぶ。一方、上位の炭素鋼接触界面近傍とその内部のベントナイトでは、石英の量はその値とそれほど大きく異ならず、界面近傍で 53、内部では 58 wt.% であった。それ以外の鉱物の量比は大きな違いはない結果となった。

Wt% - Rietveld

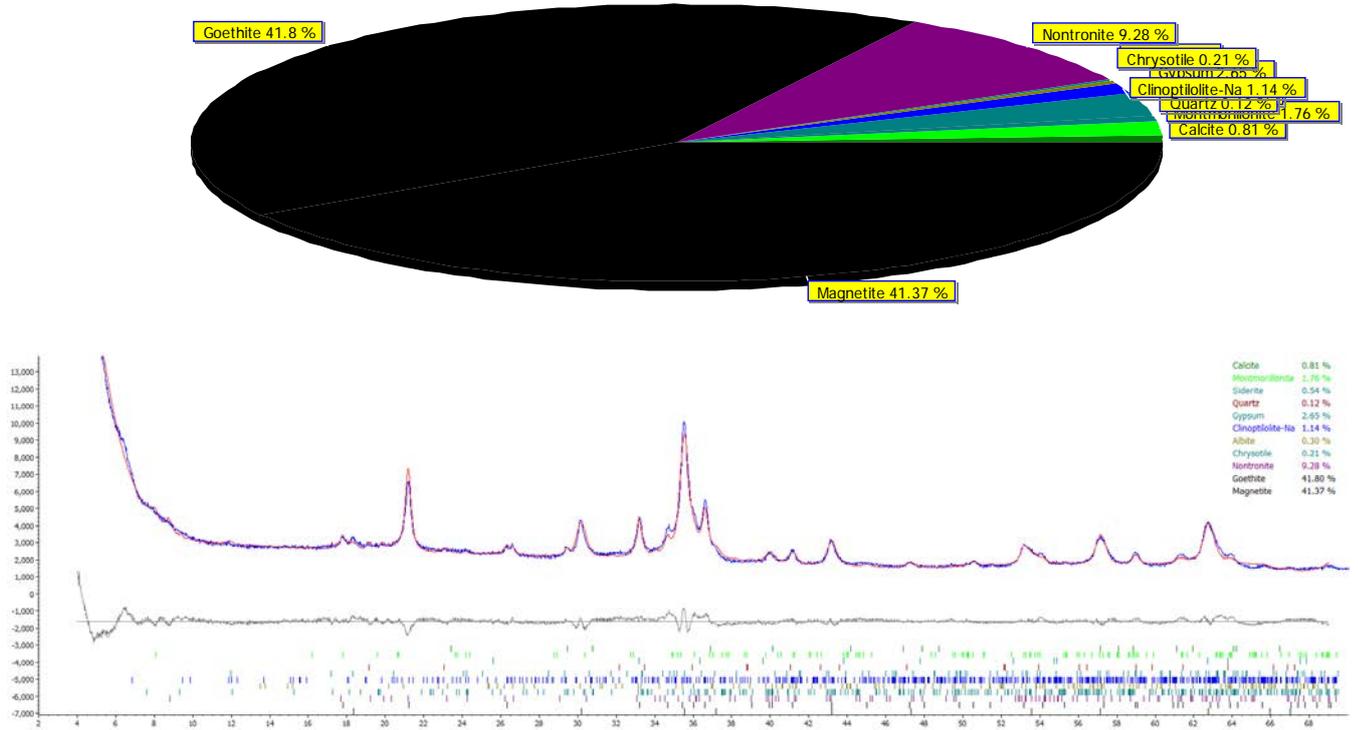


図 3.2.3-165 IH-A-1 試料（炭素鋼腐食界面）の XRD リートベルト解析

Wt% - Rietveld

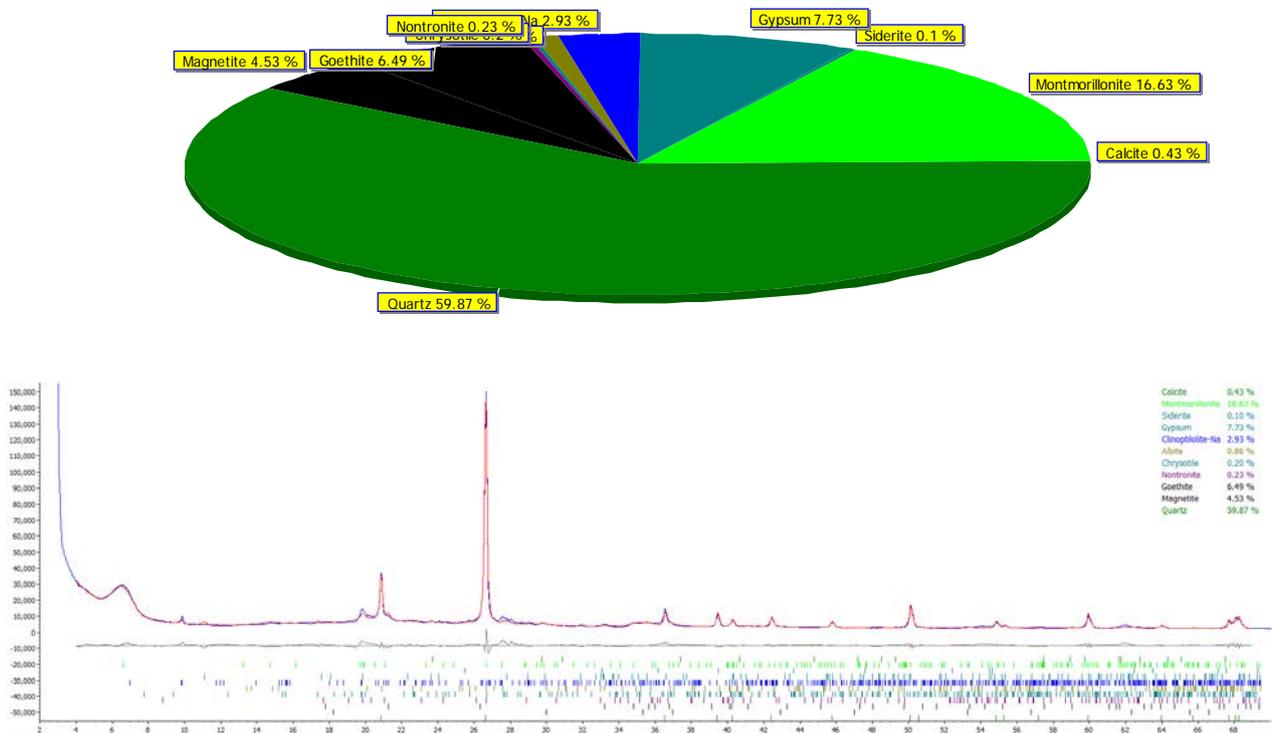


図 3.2.3-166 IH-A-2 試料（炭素鋼腐食界面接触ベントナイト）の XRD リートベルト解析

Wt% - Rietveld

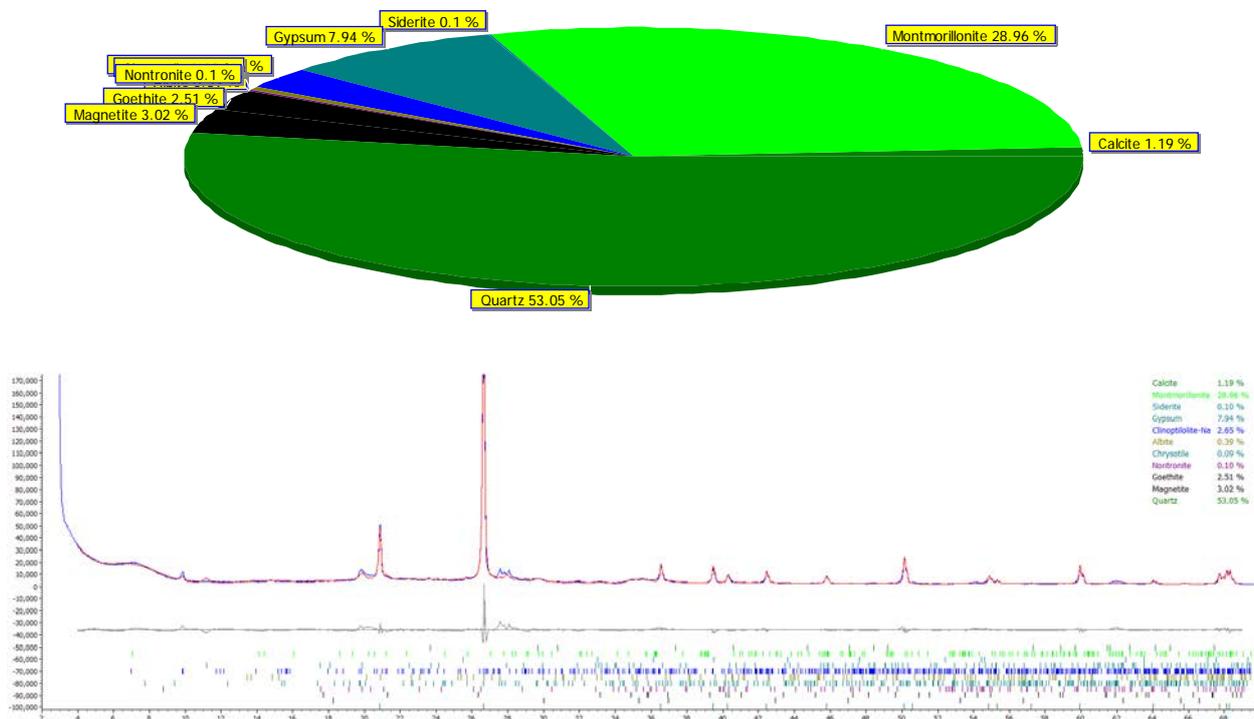


図 3.2.3-167 IH-E-1 試料(上位炭素鋼接触ベントナイト)の XRD リートベルト解析

Wt% - Rietveld

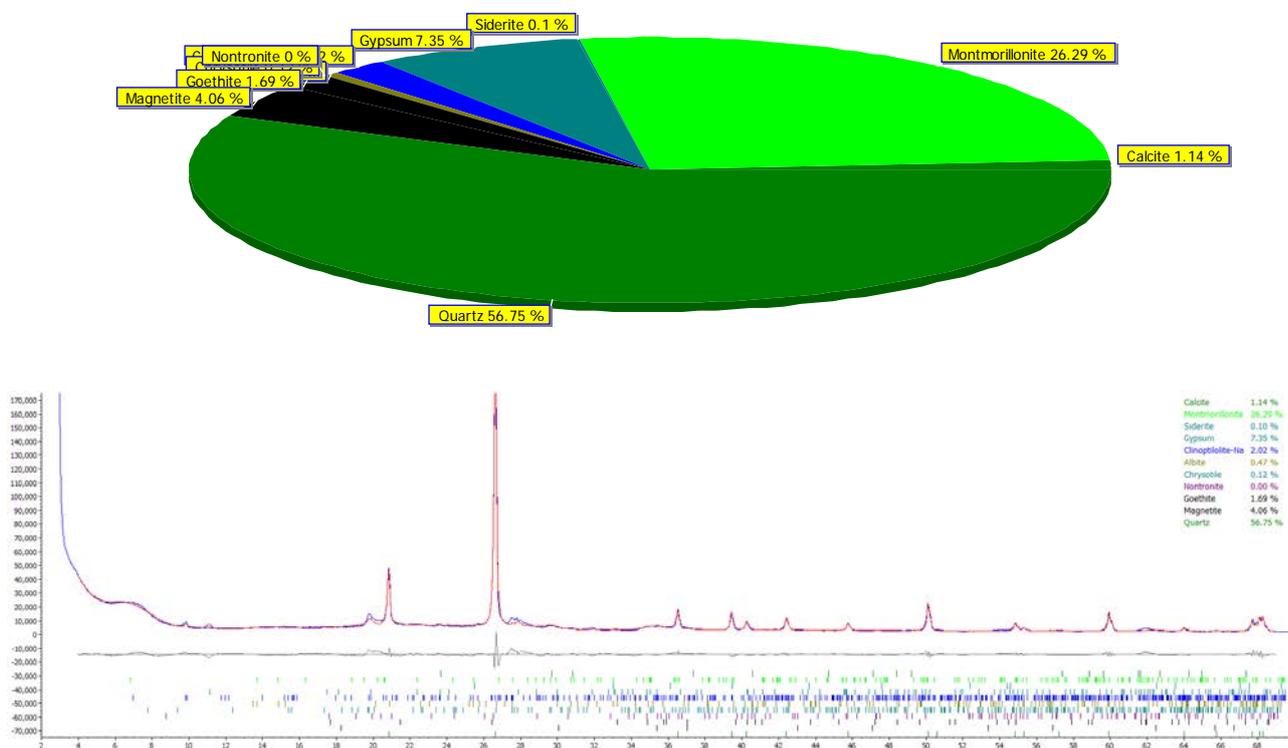


図 3.2.3-168 IH-E-2 試料(上位炭素鋼接触ベントナイト、内側)の XRD リートベルト解析

5) マイクロ XRD 分析

乾燥した接触界面試料をマイクロ XRD 測定した結果を図 3.2.3-169 に示す。この試料の特徴は、炭素鋼腐食界面の下部で褐色化が強く、上部では白色沈殿物が認められることである。これらはスクレイプして取り出し、その微小チップの XRD 測定を行った。図 3.2.3-169 に示すように、白色部は主にカルサイトと石英で構成されていることがわかった。また褐色化が進んだ腐食界面では、特徴として光沢のある沈殿物で構成されており、その XRD 回折は弱いパターンから石英、シデライト、ウスタイトの他にフェロシライトに近いピークもあるがややずれていて、詳細な分析が必要である。それ以外の緩衝材側の変質試料(IH-A, B, C の順に下部から上部)では、石英、シデライト、磁鉄鉱のピークが認められ、最も上部ではベントナイトの主成分であるモンモリロナイトと石英のピークが強く認められる。表面を覆う赤色沈殿物は赤鉄鉱と思われる。

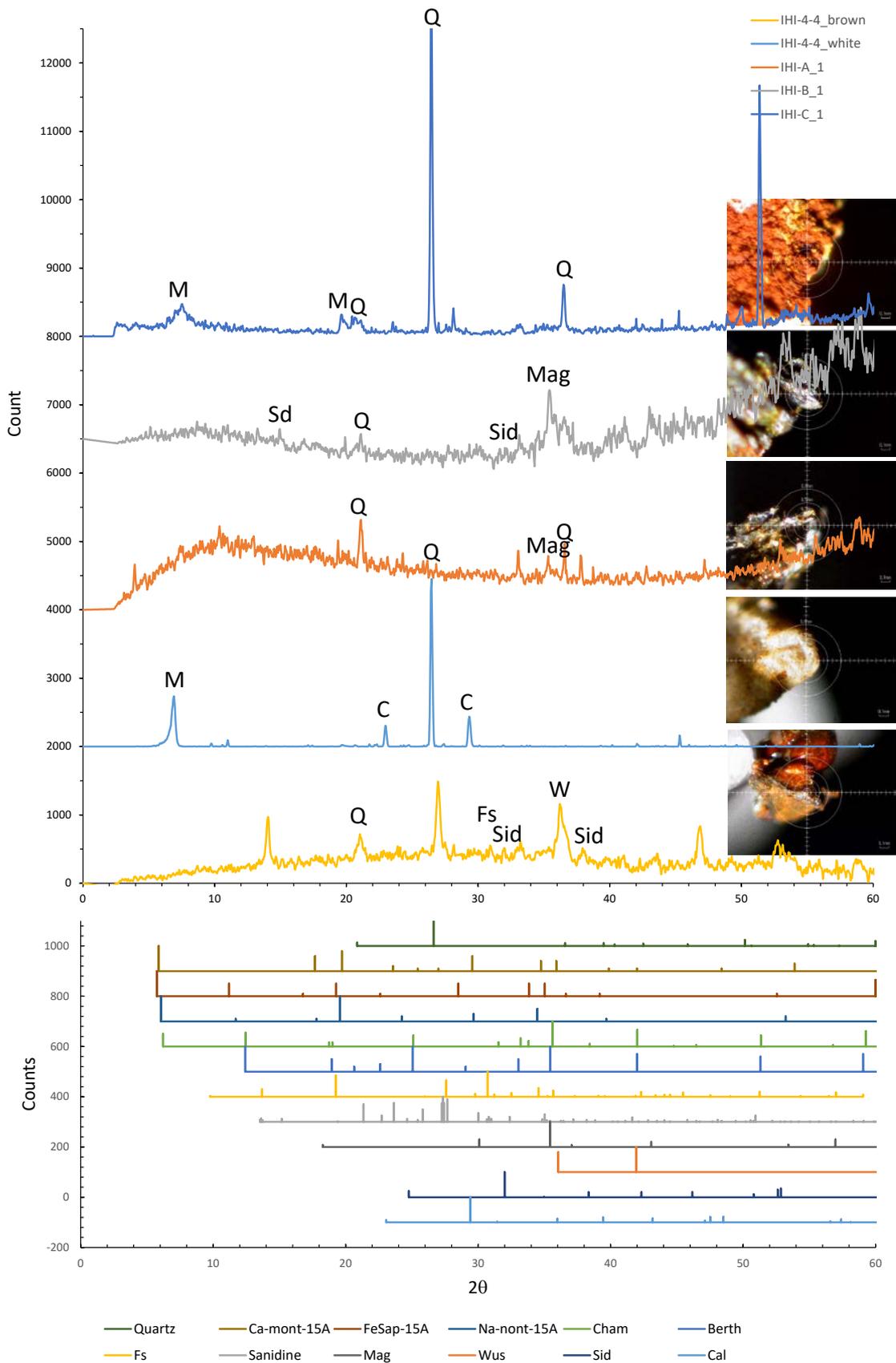


図 3.2.3-169 室内腐食試験の緩衝材界面試料のマイクロ XRD パターン

(6) まとめ—ベントナイトの鉄との接触による化学変質の整理—

上記の結果より、鉄及びベントナイトの化学的な変化に関して、試験の対象とされた処分環境、経過時間等を考慮した上でベントナイトの機能劣化の観点で表 3.2.3-16 に要素を整理した。

表 3.2.3-16 炭素鋼接触ベントナイトの相互作用の要素関連表

ベントナイト 炭素鋼	液相	モンモリロナイト	シリカ	長石
Eh-pH	海水系と淡水系で異なる	pH は溶解速度に影響	pH は溶解速度に影響 溶解速度は淡水系(low Eh)で加速している。 海水系ではトリディマイトの沈殿が顕著。	pH は溶解速度に影響 モンモリロナイトの Fe 変質時の Al 排出で生成する二次鉱物として重要
溶接金属と炭素鋼成分 Mn, Cu, C	溶接の有無に無関係に Mn 溶出	溶接の有無に無関係に Fe 変質して鉄サポナイトかノントロナイト化 淡水系で速い	関係は不明	関係は不明
Fe(OH) ₂ FeO	海水系も淡水系も存在	不明	不明	不明
Amorphous Fe-Cl-S silicate	海水系で発達が顕著	グリーンライトへ変質	共存する場合がある	不明
Fe ₃ O ₄ FeCO ₃	海水系で支配的	関係は不明	二次的なシリカと共存している	不明

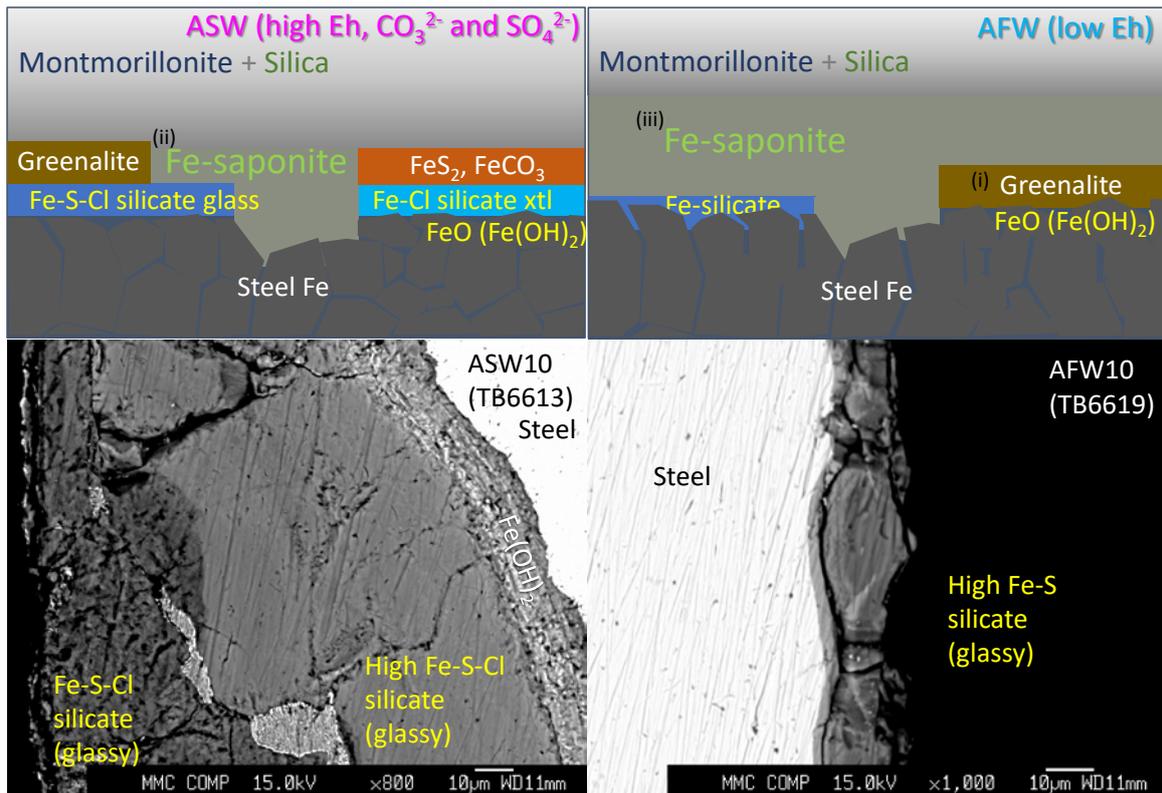


図 3.2.3-170 炭素鋼の変質モデルとベントナイト接触炭素鋼界面の断面微細観察

海水系の炭素鋼はその表面が高い Cl 濃度により溶解沈殿（腐食）し、最表面には $\text{Fe}(\text{OH})_2$ を形成している。しかし、その際に生じる高い pH 溶液はベントナイトの硅砂やカルセドニーなど溶解度の高いシリカ、そしてベントナイトそのものを溶解させることでシリカが飽和する（ラマン測定結果）。つまり炭素鋼界面近傍にはケイ酸に富む溶液が常に生じている。これと炭素鋼からもたらされた Fe^{2+} はケイ酸塩鉱物を作らずに、非晶質な Si-Fe-S-Cl ガラスを形成していることが今回新たにわかった。このガラスから生成する結晶は非常に微細な離溶組織を持っているが、化学組成の特徴から FeC（オーステナイト鋼など）と Fe-Cl ケイ酸塩ガラスの類であると思われる。したがって、Steel- $\text{Fe}(\text{OH})_2$ -FeC-Fe-S-Cl ケイ酸塩ガラス-Fe-Cl ケイ酸塩結晶の多層構造が真の炭素鋼/ベントナイト接触界面である。この金属鉄からケイ酸塩への遷移帯を経て、ベントナイトの粘土鉱物は変質をしている。Cl-S に乏しい淡水系では、この金属鉄-ケイ酸塩遷移帯が薄いことから、溶解した Fe^{2+} は遷移帯バッファーが小さい系で粘土は変質する。したがって、粘土への Fe^{2+} の供給はより直接的で、海水系のときよりも大きくなっていると考えやすい。これらを言い換えると、海水系は炭素鋼を、淡水系はベントナイトを変質しやすいことになる。

すなわち、海水系では溶解しやすい炭素鋼のケイ酸塩化により穏やかな粘土変質が起こるが、淡水系では溶解は少ないが溶けた Fe^{2+} がダイレクトに粘土を変質させ、Fe 蛇紋石やサポナイトを形成する。この違いはおそらく初期の変質開始のタイミングの違いとして表れるはずで、ベントナイトのサポナイト化は淡水系で早期に起こると考えられる。しかし、炭素鋼の溶解量が小さいため、小規模なものにとどまると考えられ、モンモリロナイトからサポナイトへのモル体積変化は正 (453.04 から 598.13 \AA^3) のため、炭素鋼とベントナイトのフィッティングは維持される。

もしも炭素鋼がケイ酸塩化した場合も、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ や Fe-silicate など金属鉄以上のモル体積を有する物質が寄与して接触界面はタイトになるかもしれない。

緩衝材と炭素鋼ヒーターを用いた2つの試験では、幌延地下施設で上部、室内試験でも上部でベントナイトや炭素鋼の強い変質を確認した。この垂直方向の変質のバリエーションは通水の有無が関係していると考えられる。幌延試験では現地地下水は海水の 1/4 程度の溶液系で、室内試験では海水の 1/6 程度の塩水溶液系であることが間隙水の測定からそれぞれわかっているが、両試験とも鉄を腐食させるに十分な Cl を溶液に含んでいる。室内試験の試料においては特に炭素鋼の腐食界面はぼそぼそに脆化しており、生成した腐食鉍物が空隙を確保する機構が存在していると考えられる。その主な原因としては何等かの溶解促進機構が必要であり、その要因として pH 以外に水素の存在が考えられるがまだよくわかっていない。

各溶液系におけるこれらの材料の変質相について表 3.2.3-17 にまとめたものを示す。

表 3.2.3-17 溶液系における変質相の違い

溶液系	炭素鋼の変質相	ベントナイトの変質相
海水	$\text{Fe}(\text{OH})_2$ Fe-silicate (Na, S, Cl 含む) Fe_3O_4 (酸化的なとき) FeCO_3 MnS SiO_2	Fe 蛇紋石 Fe サポナイト ノントロナイト(酸化的なとき) サニディン 石膏
淡水	$\text{Fe}(\text{OH})_2$ Fe-silicate (Na, S 含む) Fe_3O_4 (酸化的なとき) SiO_2	Fe 蛇紋石 Fe サポナイト サニディン

3.3 イオン交換によるベントナイトの変質

再冠水期間に起こる化学変質としては短期間での変質が対象となるため、イオン交換が主として想定される。ここでは、緩衝材流出試験で使用されたブロック試料を対象に、 Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} それぞれのイオンが緩衝材表面でどのような挙動を示すのかを把握するための浸漬試験および、試験後の分析を行った。これまでに、 NaCl 水溶液と CaCl_2 水溶液を緩衝材流出試験に使用した場合、表面の状態、水みちの形成状況が違っていることが示されている。しかし、イオン交換率等は測定していなかったため、 KCl 、 MgCl_2 も含めて性状の変化とイオン交換率等を測定する。さらに、地化学計算 (PHREEQC) により得られたイオン交換後の状態と比較し、その進展について考察する。

3.3.1 試料の前処理

流出試験試料については、ビーカー内で膨潤させた後、大型ピペット（5 ml）によって液ごと膨潤界面を吸引して回収した。図 3.3.1-1 に各イオン溶液への浸漬の経時変化を示す。

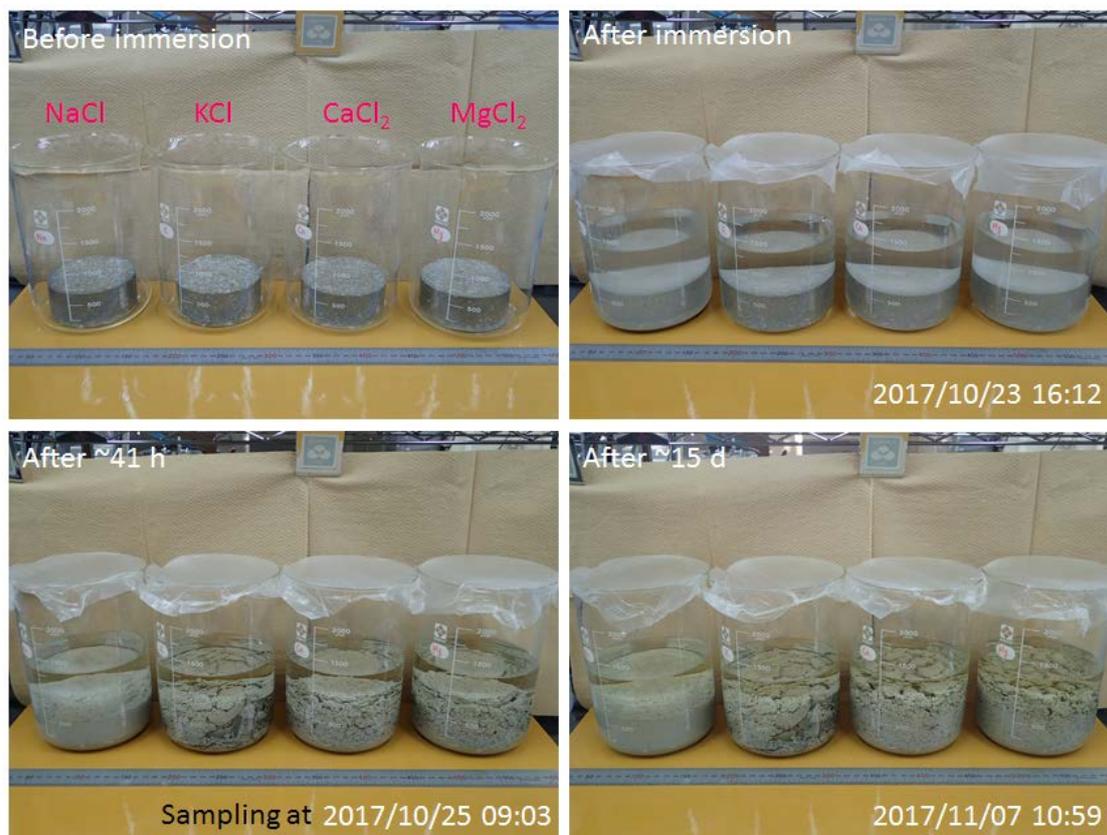


図 3.3.1-1 ブロック試料の浸漬の様子（各溶液はイオン強度：0.5M）

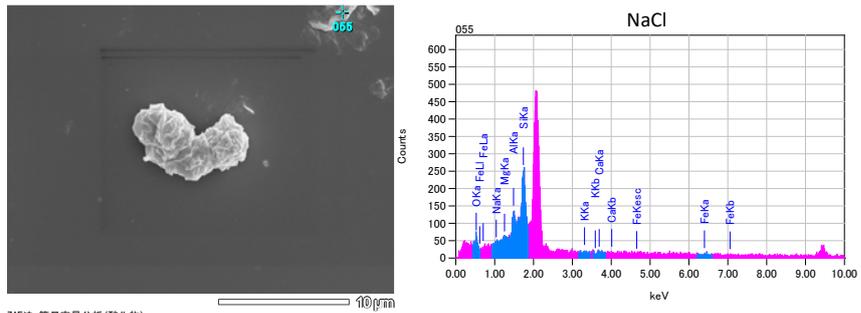
3.3.2 分析結果

(1) FESEM 観察及び EDS 分析

回収した試料の一部はエタノール中で反応を停止させて、固相については純水中に分散させて、余剰の溶液成分をイオン交換樹脂によって除去したのち、HOPG グラファイト基板の上に滴下して FESEM-EDS 観察を行った。以下にその結果を示す。

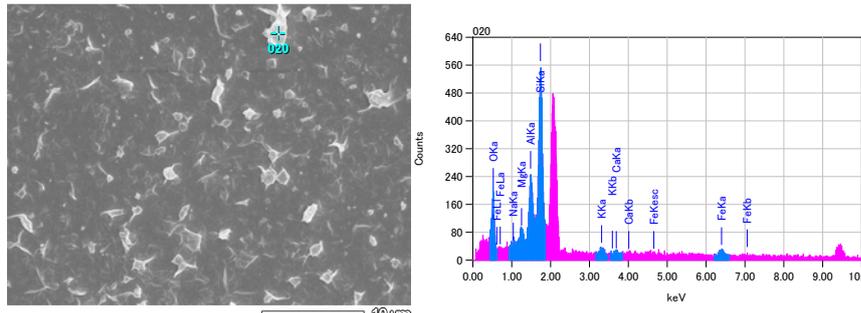
1) NaCl 浸漬

HOPG 基板上で確認された粒子の観察と比較的に密に堆積している領域の組成分析を行った。



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.8083
 全検素数: 22.0

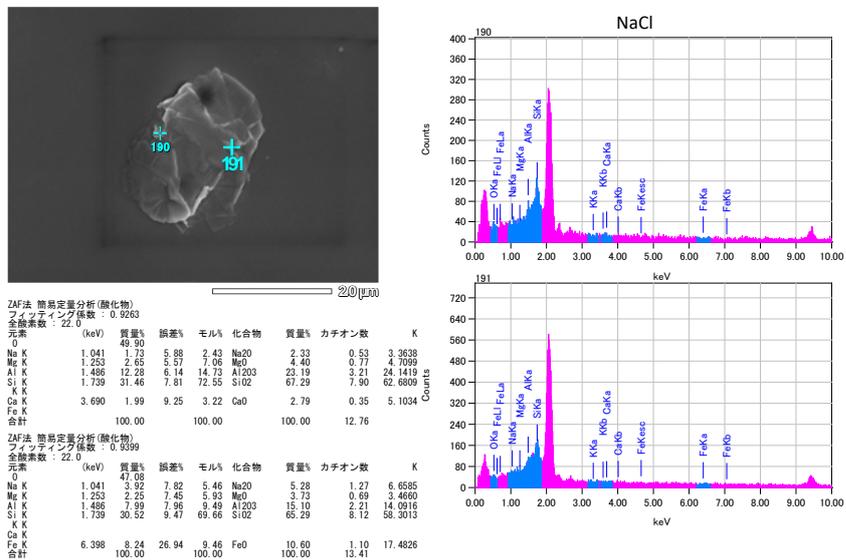
元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	49.05							
Na K	1.041	1.62	2.69	2.30	Na2O	2.19	0.51	2.9513
Mg K	1.253	2.74	2.52	7.35	MeO	4.55	0.81	4.6993
Al K	1.486	5.93	2.76	11.98	Al2O3	18.76	5.64	18.6159
Si K	1.739	31.28	3.40	72.48	SiO2	66.92	7.99	61.3351
K K	3.312	0.12	3.01	0.10	K2O	0.14	0.02	0.2785
Ca K	3.690	2.63	4.05	4.27	CaO	3.68	0.47	6.5978
Fe K	6.398	2.63	10.97	1.53	Fe2O3	3.76	0.34	5.6122
合計		100.00		100.00		100.00		12.78



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.5574
 全検素数: 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	47.26							
Na K	1.041	1.03	0.98	1.53	Na2O	1.39	0.33	1.7238
Mg K	1.253	3.12	0.90	8.77	MeO	5.18	0.96	4.9163
Al K	1.486	9.53	0.98	12.05	Al2O3	18.00	2.62	16.8228
Si K	1.739	28.38	1.18	68.97	SiO2	60.71	5.53	53.2515
K K	3.312	2.26	1.02	1.97	K2O	2.72	0.43	5.2240
Ca K	3.690	1.43	1.39	2.43	CaO	2.00	0.28	3.4820
Fe K	6.398	6.99	3.73	4.27	Fe2O3	9.99	0.93	14.5796
合計		100.00		100.00		100.00		13.08

図 3.3.2-1 NaCl 浸漬-(1)



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.9263
 全検素数: 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	49.90							
Na K	1.041	1.73	5.88	2.43	Na2O	2.33	0.53	3.3638
Mg K	1.253	2.65	5.57	7.06	MeO	4.40	0.77	4.7099
Al K	1.486	12.28	6.14	14.73	Al2O3	23.19	3.21	24.1419
Si K	1.739	31.46	7.81	72.55	SiO2	67.29	7.90	62.6809
Ca K	3.690	1.99	9.25	3.22	CaO	2.79	0.35	5.1034
Fe K								
合計		100.00		100.00		100.00		12.76

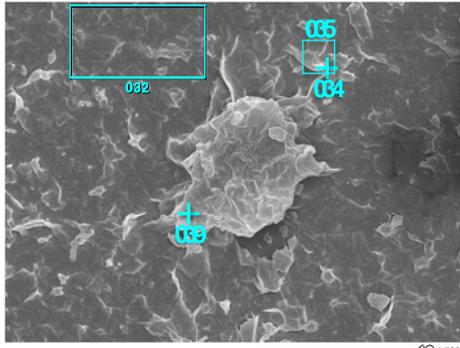
ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.9399
 全検素数: 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	47.08							
Na K	1.041	3.92	7.82	5.46	Na2O	5.28	1.27	6.6585
Mg K	1.253	2.25	7.45	5.93	MeO	3.73	0.69	3.4660
Al K	1.486	9.99	7.99	9.49	Al2O3	15.10	2.21	14.0916
Si K	1.739	30.52	9.47	69.86	SiO2	65.29	8.12	58.3915
Ca K								
Fe K	6.398	8.24	26.94	9.46	FeO	10.60	1.10	17.4826
合計		100.00		100.00		100.00		13.41

図 3.3.2-2 NaCl 浸漬-(2)

2) KCl 浸漬

HOPG 基板上で確認された粒子の観察と比較的に密に堆積している領域の組成分析を行った。



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.9288
 全酸素数: 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	48.80							
Na K	1.253	3.06	6.37	7.73	MgO	5.07	0.91	4.8952
Mg K	1.486	5.09	7.05	5.80	Al2O3	9.61	1.36	9.0156
Al K	1.739	34.73	8.32	76.11	SiO2	74.30	8.92	67.2183
Si K	3.312	3.26	7.79	2.56	K2O	3.92	0.60	7.1660
K K	3.690	5.07	10.64	7.79	CaO	7.10	0.91	11.7050
Ca K								
Fe K								
合計		100.00		100.00		100.00		12.70

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.8855
 全酸素数: 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	47.48							
Na K	1.041	0.59	4.20	0.91	Na2O	0.79	0.19	0.9304
Mg K	1.486	8.54	3.99	11.20	Al2O3	16.13	2.35	15.0173
Al K	1.739	30.99	4.84	78.11	SiO2	66.30	8.18	57.9553
Si K	3.312	4.15	4.32	3.76	K2O	5.00	0.79	9.2468
K K	3.690	0.71	5.59	1.25	CaO	0.99	0.13	1.6561
Ca K	6.398	7.55	15.77	4.78	Fe2O3	10.79	1.00	15.1941
Fe K								
合計		100.00		100.00		100.00		12.63

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.8689
 全酸素数: 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	49.79							
Na K	1.041	2.99	3.67	4.35	Na2O	4.03	0.92	5.6411
Mg K	1.253	0.19	3.52	0.51	MgO	0.31	0.05	0.3153
Al K	1.486	11.30	3.74	13.99	Al2O3	21.34	2.96	22.0623
Si K	1.739	33.08	4.72	78.73	SiO2	70.77	8.33	65.8807
K K	3.312	1.04	4.25	0.89	K2O	1.25	0.19	2.4458
Ca K	3.690	0.53	5.72	0.88	CaO	0.74	0.09	1.3189
Fe K	6.398	1.09	15.40	0.65	Fe2O3	1.56	0.14	2.3359
合計		100.00		100.00		100.00		12.68

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数: 0.9147
 全酸素数: 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O	47.00							
Na K	1.041	0.91	4.69	1.45	Na2O	1.23	0.30	1.4538
Mg K	1.486	10.91	4.46	14.78	Al2O3	20.62	3.03	19.3133
Al K	1.739	28.56	5.53	74.30	SiO2	61.10	7.62	52.5916
Si K	3.312	4.37	4.80	4.08	K2O	5.26	0.84	9.8393
K K								
Ca K	6.398	8.25	17.54	5.39	Fe2O3	11.79	1.11	16.8020
Fe K								
合計		100.00		100.00		100.00		12.88

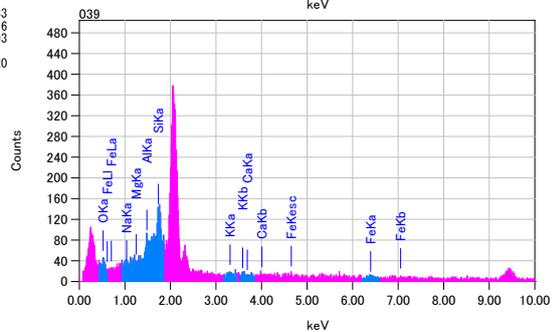
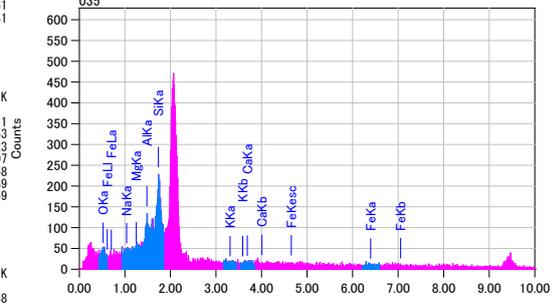
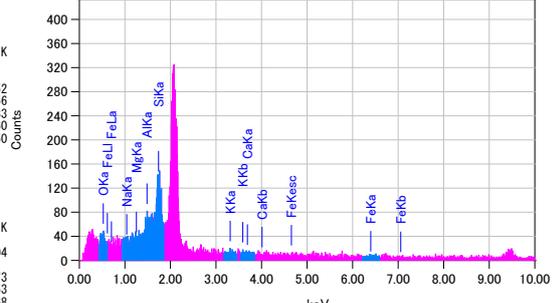
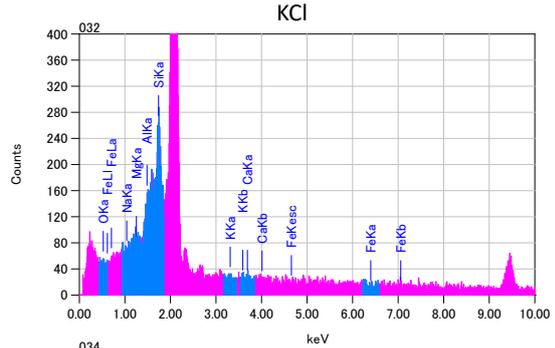
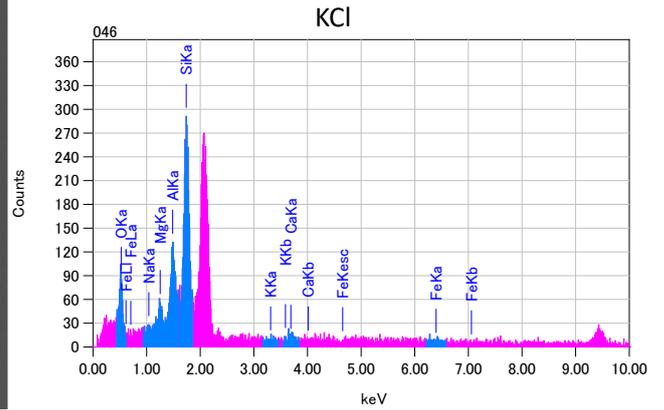
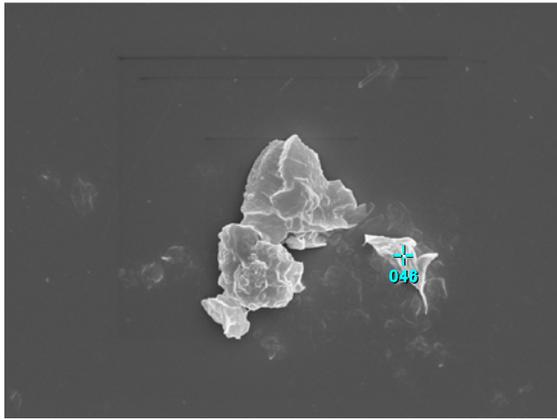


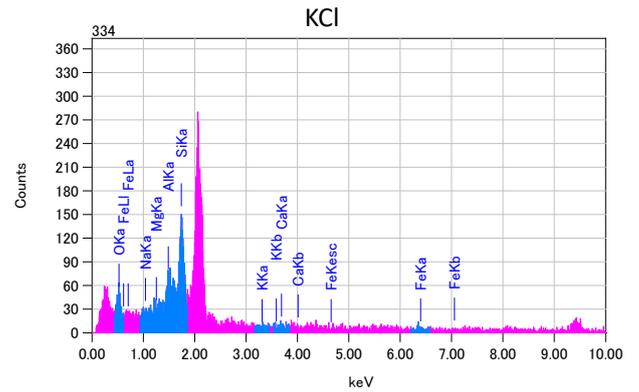
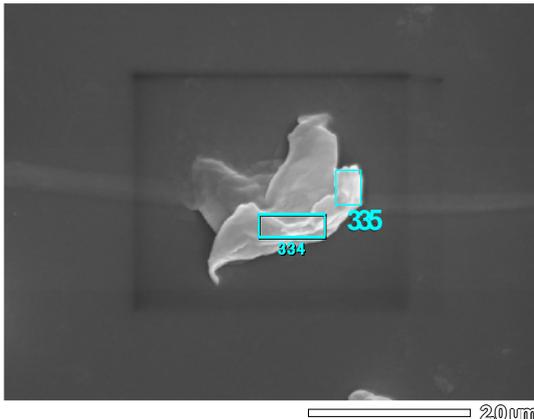
図 3.3.2-3 流出試験 (KCl 浸漬) -(1)



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数 : 0.6349
 全酸素数 : 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		49.76						
Na K	1.041	0.56	1.13	0.77	Na2O	0.76	0.17	1.0699
Mg K	1.253	4.03	1.05	10.44	MgO	6.68	1.17	7.1051
Al K	1.486	10.06	1.18	11.74	Al2O3	19.00	2.64	19.2757
Si K	1.739	32.22	1.46	72.28	SiO2	68.93	8.11	64.1936
K K	3.312	0.45	1.31	0.36	K2O	0.54	0.08	1.0689
Ca K	3.690	2.74	1.76	4.30	CaO	3.83	0.48	6.9028
Fe K	6.398	0.18	4.76	0.10	Fe2O3	0.26	0.02	0.3840
合計		100.00		100.00		100.00	12.68	

図 3.3.2-4 流出試験 (KCl 浸漬) -(2)



ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数 : 0.7976
 全酸素数 : 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		48.46						
Na K	1.041	0.54	2.48	0.77	Na2O	0.73	0.17	0.9165
Mg K	1.253	1.27	2.27	3.39	MgO	2.10	0.38	2.0337
Al K	1.486	9.77	2.42	11.80	Al2O3	18.46	2.63	17.9510
Si K	1.739	31.79	2.98	73.75	SiO2	68.01	8.22	61.1957
K K	3.312	0.41	2.65	0.34	K2O	0.49	0.08	0.9372
Ca K	3.690	1.96	3.56	3.19	CaO	2.74	0.36	4.8203
Fe K	6.398	5.80	8.66	6.77	FeO	7.47	0.75	12.1456
合計		100.00		100.00		100.00	12.59	

ZAF法 簡易定量分析(酸化物)
 フィッティング係数 : 0.8614
 全酸素数 : 22.0

元素	(keV)	質量%	誤差%	モル%	化合物	質量%	カチオン数	K
O		49.33						
Na K	1.041	0.21	4.13	0.28	Na2O	0.28	0.06	0.3804
Mg K	1.253	3.82	3.81	9.83	MgO	6.33	1.12	6.5323
Al K	1.486	8.81	4.27	10.22	Al2O3	16.65	2.33	16.4440
Si K	1.739	32.56	5.23	72.57	SiO2	69.66	8.27	63.9509
K K	3.312	1.48	4.73	1.19	K2O	1.79	0.27	3.4287
Ca K	3.690	3.78	6.40	5.91	CaO	5.30	0.67	9.2636
合計		100.00		100.00		100.00	12.73	

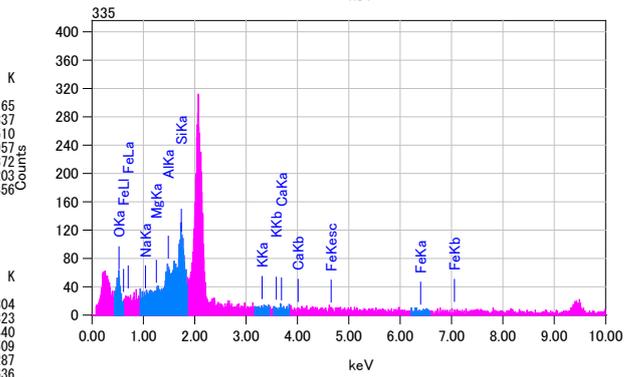


図 3.3.2-5 流出試験 (KCl 浸漬) -(3)

3) CaCl₂ 浸漬

HOPG 基板上で確認された粒子の観察と比較的に密に堆積している領域の組成分析を行った。

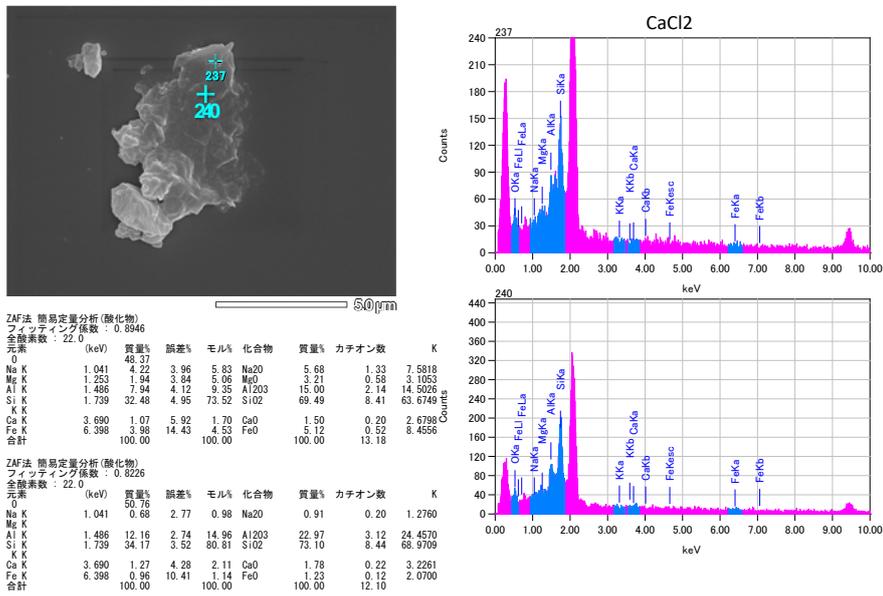


図 3.3.2-6 流出試験 (CaCl₂ 浸漬) -(1)

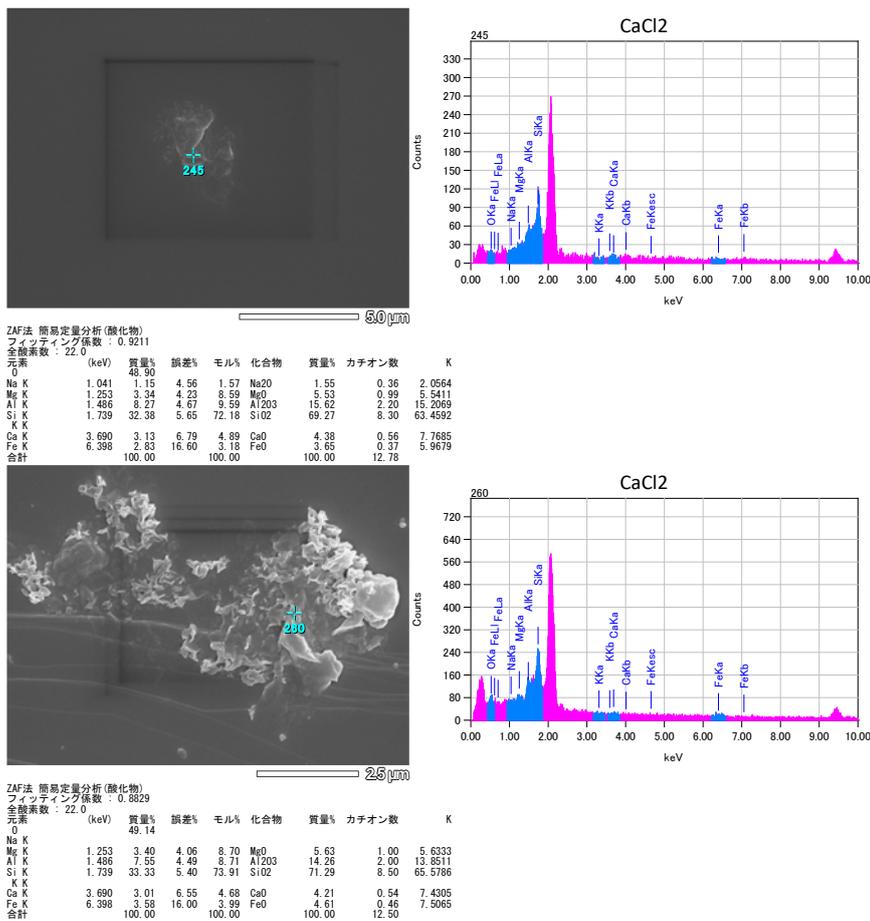


図 3.3.2-7 流出試験 (CaCl₂ 浸漬) -(2)

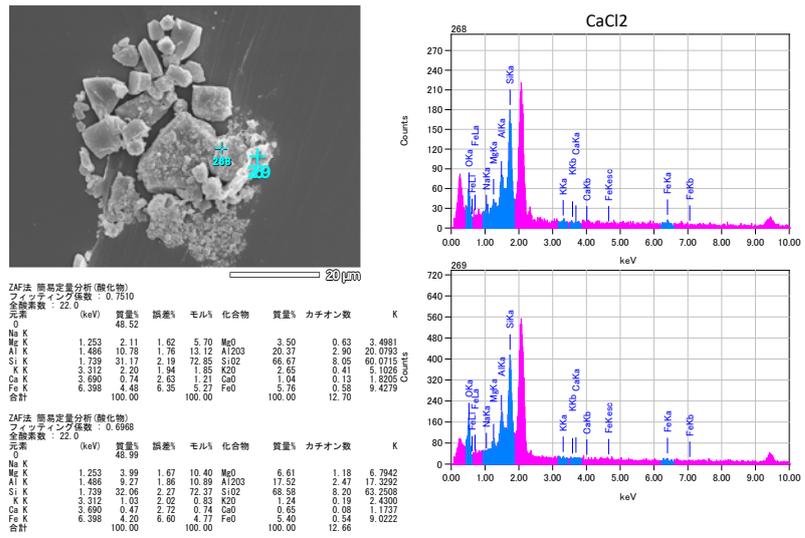


図 3.3.2-8 流出試験 (CaCl₂ 浸漬) -(3)

4) MgCl₂ 浸漬

HOPG 基板上で確認された粒子の観察と比較的に密に堆積している領域の組成分析を行った。

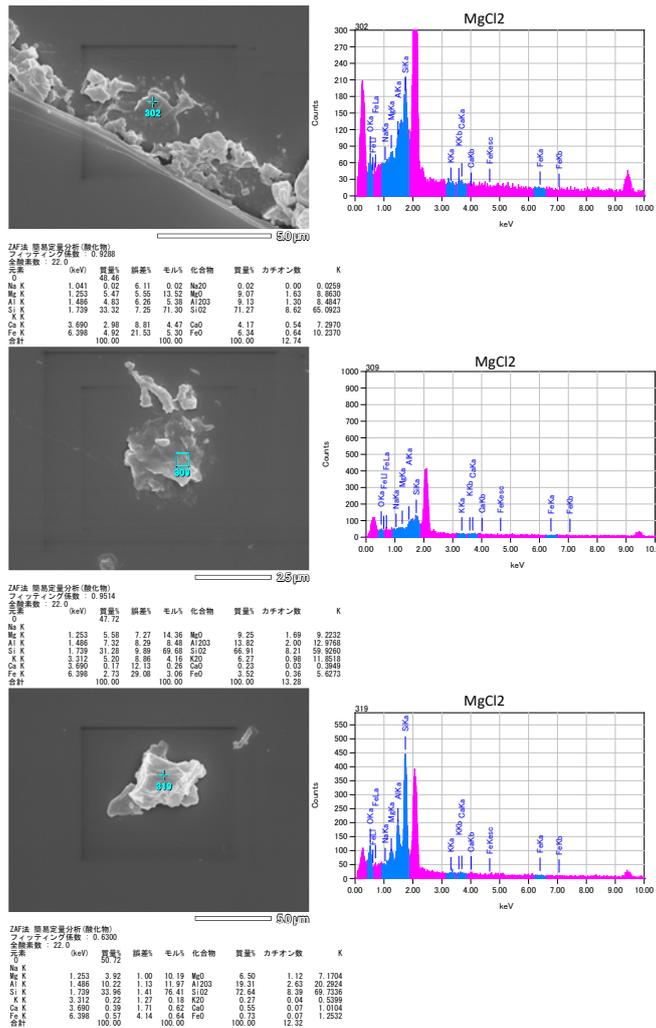


図 3.3.2-9 流出試験 (MgCl₂ 浸漬) -(1)

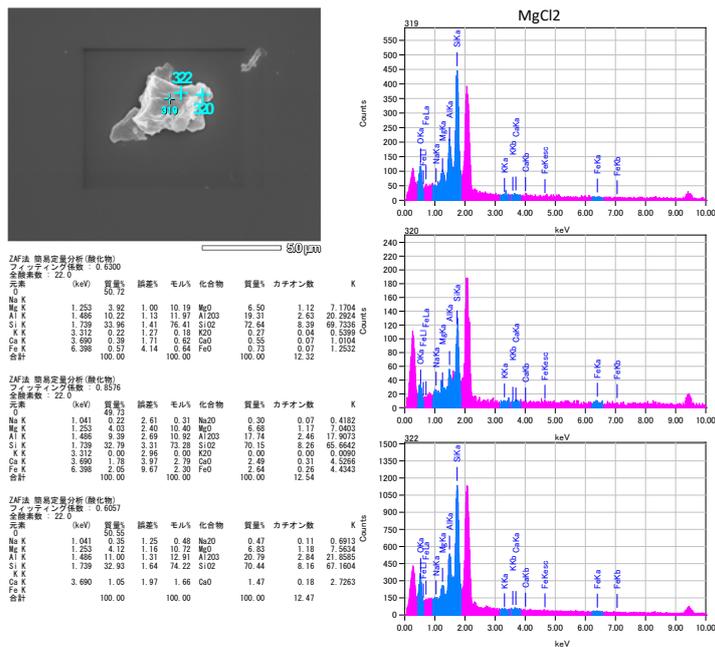


図 3.3.2-10 流出試験 (MgCl₂ 浸漬) -(2)

(2) 溶液分析

回収した固相と液相は遠心分離機によって固液分離を行った。固相については、余剰の溶液を除去して真空乾燥し、それを純水洗浄によって洗い出した溶液を分析し、密度 1.4 に基づく空隙率を使って計算することで、洗浄液組成からベントナイト間隙水の化学組成を求めた。液相については限外ろ過の後、ICP-AES 分析を実施した。結果を表 3.3.2-1 に示す。

試験後に回収したベントナイトは従来法による CEC 測定に供した。その結果を表 3.3.2-2 に示す。交換性陽イオンの組成については出発試料と合わせて図 3.3.2-11 に比較表示した。各溶液の陽イオン組成を反映した層間陽イオン組成が確認できるが、Na, K に関しては同等の交換が起きているのに対し、Mg はやや過剰、Ca については大過剰なイオン組成(meq/100g)を表す結果となった。しかし、構成陽イオンの組成(図 3.3.2-11)を見ると、一旦占有した Ca イオンは層間陽イオンとして非常に強固に固定されており、他のイオンとの交換によっても層間サイトに一方的に残り続けていることがわかる。

表 3.3.2-1 流出試験溶液と回収した固相間隙水の化学組成分析値

SampleID	Si (mM)	Al	Fe	Ca	Mg	Na	K	Mn	Cl	SO4
<i>Solution (initial)</i>										
NaCl	9.968E-04	2.632E-03	1.074E-04	7.236E-04	2.180E-03	4.392E+02	1.279E-03	5.169E-04	4.567E+02	7.911E-03
KCl	2.243E-03	1.260E-03	1.074E-04	2.645E-03	2.180E-03	4.515E-01	4.266E+02	5.169E-04	5.055E+02	1.384E-02
CaCl	5.340E-04	5.560E-04	1.074E-04	1.373E+02	2.180E-03	1.409E-01	2.974E-02	5.169E-04	3.173E+02	1.384E-02
MgCl	5.340E-04	5.560E-04	1.074E-04	7.236E-04	1.303E+02	4.298E-02	1.279E-03	5.169E-04	3.047E+02	1.384E-02
<i>Solution (after run)</i>										
N3-W-NaCl	9.352E-02	5.560E-04	1.074E-04	9.786E-01	6.273E-02	4.717E+02	1.279E-03	5.169E-04	4.759E+02	6.068E-01
N3-W-KCl	1.249E-01	5.560E-04	1.074E-04	2.015E+00	6.052E+01	5.386E+01	1.632E+02	1.937E-03	3.678E+02	1.362E+00
N3-W-CaCl	1.951E-01	5.560E-04	1.074E-04	1.111E+02	4.138E-01	4.822E+01	1.095E+00	6.389E-04	3.058E+02	2.094E+00
N3-W-MgCl	1.287E-01	5.560E-04	1.074E-04	1.795E+00	5.541E+01	5.859E+01	1.888E+02	2.000E-03	3.884E+02	1.409E+00
<i>Porewater (washing water)</i>										
N3-K-NaCl_pore	6.063E-02	5.226E-03	1.074E-04	3.787E-02	9.294E-01	2.805E+00	1.279E-03	5.169E-04	5.052E+00	7.068E-02
N3-K-KCl_pore	2.827E-01	6.787E-02	5.927E-03	3.366E-02	8.079E-02	2.849E+00	7.225E+00	5.169E-04	9.642E+00	3.352E-01
N3-K-CaCl_pore	8.473E-02	9.785E-03	5.013E-04	5.869E-01	2.838E-03	9.001E-01	3.471E-02	5.169E-04	2.248E+00	3.154E-01
N3-K-MgCl_pore	1.448E-01	3.451E-02	2.274E-03	1.148E-02	9.367E-02	3.909E+00	9.616E-03	5.169E-04	3.921E+00	2.571E-02
<i>Porewater (density-based)</i>										
N3-K-NaCl_pore	2.455E+00	2.116E-01	4.350E-03	1.534E+00	3.764E+01	1.136E+02	5.178E-02	2.093E-02	2.046E+02	2.862E+00
N3-K-KCl_pore	7.491E+00	1.798E+00	1.570E-01	8.919E-01	2.141E+00	7.549E+01	1.915E+02	1.370E-02	2.555E+02	8.882E+00
N3-K-CaCl_pore	8.389E+00	9.689E-01	4.964E-02	5.811E+01	2.810E-01	8.913E+01	3.436E+00	5.118E-02	2.226E+02	3.123E+01
N3-K-MgCl_pore	9.367E+00	2.232E+00	1.471E-01	7.423E-01	6.058E+00	2.528E+02	6.220E-01	3.343E-02	2.536E+02	1.663E+00

表 3.3.2-2 流出試験試料の陽イオン交換容量測定結果

	定量値[ppm]				定量値[meq/100g]				陽イオン浸出量[meq/100g]	NaOH滴定量[mL]	CEC [meq/100g]
	Ca	Mg	K	Na	Ca	Mg	K	Na			
クニゲル-1	23.52	1.36	1.24	49.62	23.47	2.24	0.63	43.16	69.51	16.45	69.7
クニゲル-2	22.86	1.26	1.06	48.73	22.82	2.08	0.54	42.39	67.83	16.40	70.7
3N-K-NaCl-1	15.10	0.64	0.85	42.11	15.07	1.05	0.44	36.63	53.19	16.40	70.7
3N-K-NaCl-2	28.46	1.04	1.10	53.07	28.41	1.71	0.56	46.16	76.84	16.47	69.3
3N-K-KCl-1	24.94	0.79	60.29	2.50	24.89	1.29	30.84	2.17	59.19	16.78	63.1
3N-K-KCl-2	23.35	0.75	59.72	2.58	23.30	1.23	30.55	2.25	57.33	16.40	70.7
3N-K-MgCl-1	27.58	31.76	1.36	3.09	27.52	52.26	0.70	2.69	83.16	15.90	80.7
3N-K-MgCl-2	23.05	27.65	1.19	2.81	23.01	45.49	0.61	2.44	71.55	16.00	78.7
3N-K-CaCl-1	88.38	1.72	1.41	3.55	88.20	2.83	0.72	3.08	94.83	15.56	87.5

12

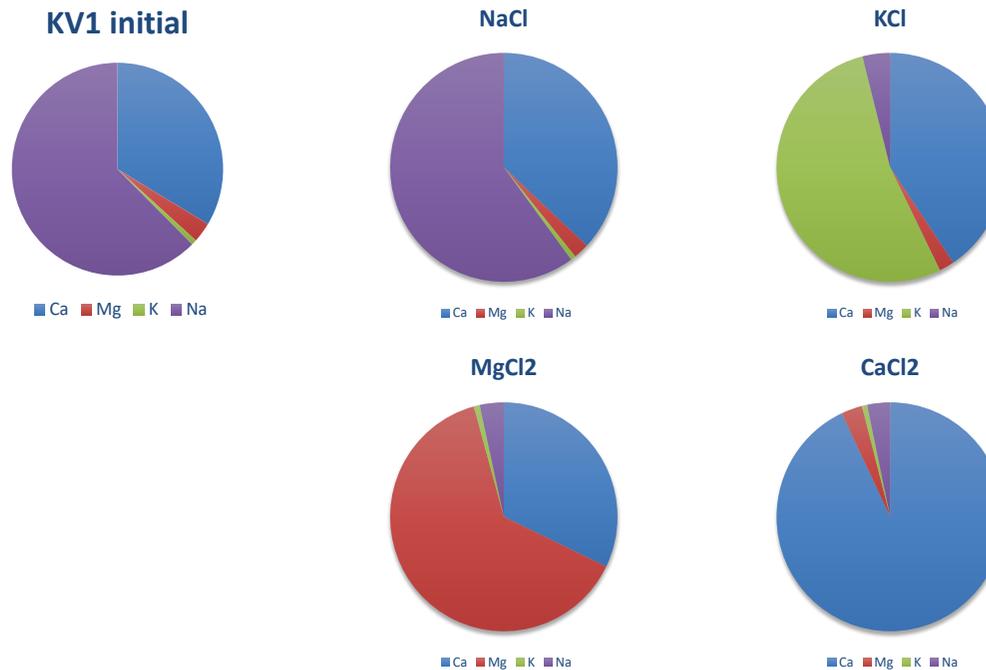


図 3.3.2-11 流出試験ベントナイトの交換性陽イオン組成(meq/100g の割合)

前述したモンモリロナイトの FESEM-EDS による陽イオン組成を表 3.3.2-3 に示す。この値が CEC 測定時に得られた交換性陽イオン組成と対応するはずであるが、図 3.3.2-12(a)に示す通り、一部の低濃度成分を除くと概ね傾向は整合的である。

表 3.3.2-3 EDS 分析により得られたモンモリロナイトの陽イオン組成

FESEM-EDS	Si	Al	Fe	Ca	Mg	Na	K	total
NaCl	7.990	2.640	0.340	0.470	0.810	0.510	0.020	12.780
	7.530	2.630	0.930	0.260	0.960	0.330	0.430	13.070
	7.900	3.210	0.000	0.350	0.770	0.530	0.000	12.760
	8.120	2.210	1.100	0.000	0.690	1.270	0.000	13.390
Mont (NaCl)	7.885	2.673	0.593	0.270	0.808	0.660	0.113	13.000
KCl	8.920	1.360	0.000	0.910	0.910	0.000	0.600	12.700
	8.180	2.350	1.000	0.130	0.000	0.190	0.790	12.640
	8.330	2.960	0.140	0.090	0.050	0.920	0.190	12.680
	7.620	3.030	1.110	0.000	0.000	0.300	0.840	12.900
	8.270	2.330	0.000	0.670	1.120	0.060	0.270	12.720
Mont (KCl)	8.263	2.425	0.563	0.283	0.240	0.353	0.605	12.730
CaCl ₂	8.410	2.140	0.520	0.200	0.580	1.330	0.000	13.180
	8.440	3.120	0.120	0.220	0.000	0.200	0.000	12.100
	8.300	2.200	0.370	0.560	0.990	0.360	0.000	12.780
	8.500	2.000	0.460	0.540	1.000	0.000	0.000	12.500
	8.050	2.900	0.580	0.130	0.630	0.000	0.410	12.700
	8.200	2.470	5.400	0.080	1.180	0.000	0.190	17.520
Mont (CaCl ₂)	8.413	2.440	0.317	0.440	0.663	0.187	0.000	12.460
MgCl ₂	8.620	1.300	0.640	0.540	0.190	0.000	0.000	11.290
	8.210	2.000	0.360	0.030	0.200	0.000	0.980	11.780
	8.390	2.630	0.070	0.070	0.720	0.000	0.040	11.920
	8.260	2.460	0.260	0.310	0.610	0.070	0.000	11.970
Mont (MgCl ₂)	8.328	1.914	0.266	0.226	0.430	0.036	0.204	11.404

CEC 測定時に得られた交換性陽イオン組成(mmol/100g に変換)より、間隙水(mmol/kg H₂O)と流出試料のモンモリロナイト間でのイオン交換平衡が成り立つとして、イオン交換分配係数 K_d を求めた。交換は Na をベースにして、

$$K_d = (\text{Cat/Na})_{\text{mont}} / (\text{Cat/Na})_{\text{porewater}}$$

より算出した。表 3.3.2-4 にその結果を示す。

求めた K_d が全溶液に対して妥当かを判定するために、陽イオン濃度比を X_{mont} 値(モル分率)に無次元化して間隙水とモンモリロナイト間の K_d の違いを比較した。Mg の高濃度間隙水組成において、モンモリロナイト層間 Mg との分配係数が 1 以下の異常値を示す以外は、全てモンモリロナイト側に Na に対して各陽イオンは多く分配されている。それらの大まかな値は K/Na で K_d = 5, Ca/Na では K_d = 20, Mg/Na で K_d = 160 と 2 価の陽イオンで大きな値を示した。高濃度 Mg 溶液での K_d 値の異常については、原因は不明である。

表 3.3.2-4 モンモリロナイトと間隙水との陽イオン交換平衡定数

SampleID	Mont(K/Na)	PW(K/Na)	Xmont	Xpw	Kd	Mont(Ca/Na)	PW(Ca/Na)	Xmont	Xpw	Kd	Mont(Mg/Na)	PW(Mg/Na)	Xmont	Xpw	Kd
Mont (NaCl)	0.012	0.000	0.012	0.000	26.710	0.308	0.014	0.235	0.013	22.784	0.018	0.331	0.018	0.249	0.056
Mont (KCl)	13.586	2.536	0.931	0.717	5.357	5.182	0.012	0.838	0.012	438.548	0.273	0.028	0.214	0.028	9.626
Mont (CaCl ₂)	0.234	0.039	0.190	0.037	6.064	14.297	0.652	0.935	0.395	21.927	0.458	0.003	0.314	0.003	145.377
Mont (MgCl ₂)	0.250	0.002	0.200	0.002	101.714	4.710	0.003	0.825	0.003	1604.173	9.313	0.024	0.903	0.023	388.656

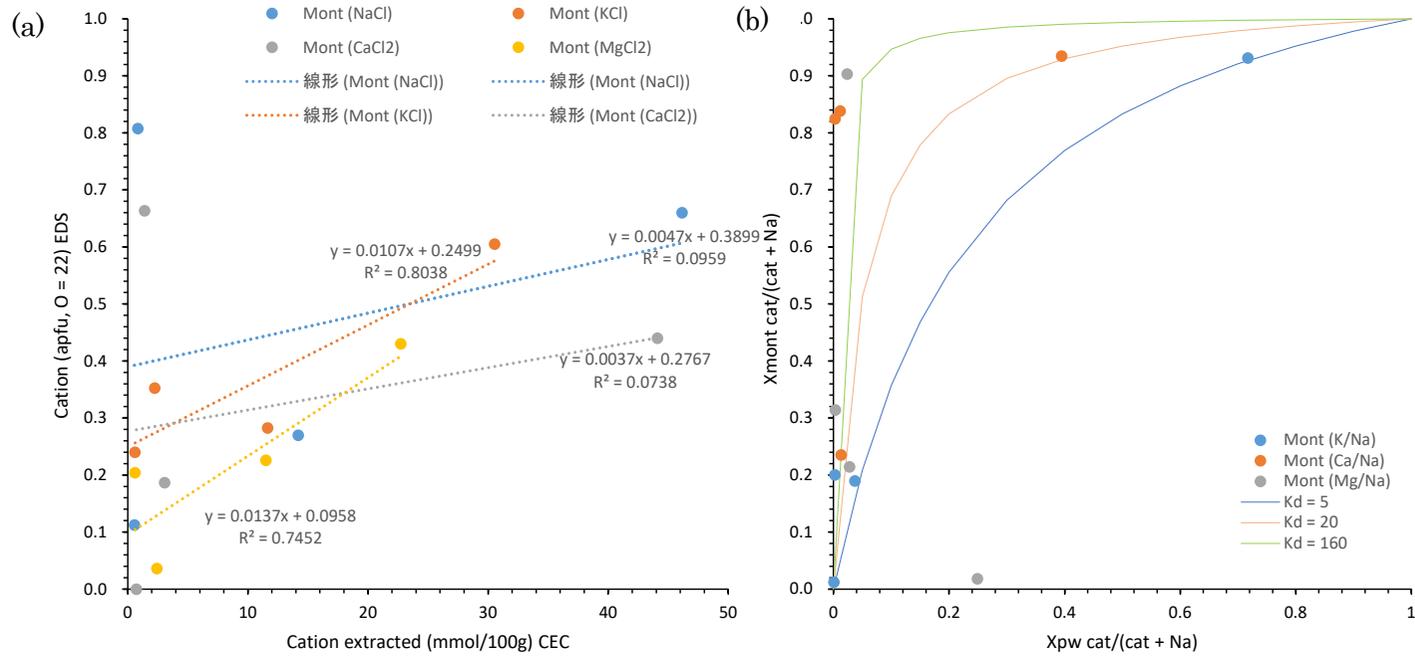


図 3.3.2-12 モンモリロナイト(mont)の層間陽イオン総数と交換性陽イオン組成(a)、および間隙水(pw)とのNaに対するイオン交換分配係数(b)

(3) イオン交換分配係数の解析的検討

流出試験における陽イオン交換挙動についての理解を深めるために地球化学解析 (PHREEQC) によって数値解析を行った。

1) 解析条件

イオン交換分配係数について、表 3.3.2-2 で求めた値の他に、TRU 第 2 次レポートで使用されている値を用いた。イオン交換分配係数を表 3.3.2-5 に示す。両者のイオン交換分配係数を比較すると、2Na-Z₂Ca の log_k は同程度であったが、ZNa-ZK と 2ZNa-Z₂Mg は試験より求めた値の方が大きな値となった。

今回の試験ではイオン強度 0.5M であったのに対し、TRU2.dat の値はイオン強度 0.1M の条件で試験をしている。また、モンモリロナイトも、今回の試験ではクニゲル V1 であるのに対し、TRU2.dat では Na 型スメクタイト (クニゲル V1 を原料とし、精製・調整したもの、陽イオン交換容量(CEC)=110.2[meq/100g]) を用いている。K_d の差は、これらのような試験条件が異なることが要因である可能性が考えられる。

表 3.3.2-5 イオン交換分配係数の比較

		log _k
試験より求めた値	2Na-Z ₂ Ca	0.73
	ZNa-ZK	1.34
	2ZNa-Z ₂ Mg	2.59
TRU2.dat	2Na-Z ₂ Ca	0.69
	ZNa-ZK	0.42
	2ZNa-Z ₂ Mg	0.67

解析に使用する液組成を表 3.3.2-6 に示す。なお、解析に用いた液相条件は表 3.3.2-1 の Solution(initial)を参照した。

表 3.3.2-6 解析に用いた液相条件

	NaCl	KCl	CaCl	MgCl
Na	4.40E-01	4.50E-04	1.4E-04	4.30E-05
K	1.30E-06	4.30E-01	3.00E-05	1.30E-06
Ca	7.20E-07	2.60E-06	1.40E-01	7.20E-07
Mg	2.20E-06	2.20E-06	2.20E-06	1.30E-01
Al	2.60E-06	1.30E-06	5.60E-07	5.60E-07
S	7.90E-06	1.40E-05	1.40E-05	1.40E-05
Cl	4.60E-01	5.10E-01	3.20E-01	3.00E-01
Si	1.10E-07	2.20E-06	5.30E-07	5.30E-07

ベントナイト仕様を表 3.3.2-7 に、交換性陽イオン組成を表 3.3.2-8 に示す。なお、交換性陽イオン組成は表 3.2.3-14 の測定結果の平均値とした。

これらから、初期固相量を表 3.3.2-9 に、初期イオン交換サイト量を表 3.3.2-10 とした。

表 3.3.2-7 クニゲル V1 の鉱物組成

鉱物	含有率 [mass%]
モンモリロナイト	48
カルセドニ	38
カルサイト	2.6

表 3.3.2-8 ベントナイトの交換性陽イオン組成（流出試験結果より）

交換性陽イオン組成	meq/100g
NaZ	42.78
CaZ2	23.15
KZ	0.59
MgZ2	2.16

表 3.3.2-9 ベントナイトの初期鉱物組成

初期鉱物		鉱物濃度 [mol/L_water]
モンモリロナイト	Na-Mont	3.8028
カルセドニ	CHALCEDO	18.3878
カルサイト	CALCITE	0.7553

表 3.3.2-10 初期イオン交換サイト量

陽イオン交換サイト	サイト量 [mol/L_water]
NaZ	1.2439
CaZ2	0.3366
KZ	0.0172
MgZ2	0.0314

2) 解析結果

解析結果を、液組成については表 3.3.2-11～表 3.3.2-12、イオン交換サイト量については表 3.3.2-13～表 3.3.2-14 に示す。交換性陽イオン組成については図 3.3.2-13～図 3.3.2-14 に比較表示した。

試験から求めた Kd 値より解析した結果と TRU2[3]に用いられる Kd 値より解析した結果を比較すると、液組成、交換性陽イオン組成ともに差はほとんどなかった。

液組成の結果について、測定結果（表 3.3.2-2）と比較すると、解析した結果の方が試験結果よりも各濃度が高い値となった。また、交換性陽イオン組成について、測定結果（表 3.3.2-2、図 3.3.2-11）では、Na の交換容量に対する各陽イオン（K、Ca、Mg）の交換割合は 9 割以上であったのに対し、解析結果では 2~3 割程度しか Na と陽イオン（K、Ca、Mg）の交換されていない。

今回の解析では、ベントナイトの変質モデルを考慮していないので、試験と解析では異なる結果となった可能性が考えられる。また、試験はゲル化しているの、解析モデルとしては 1 分子のモンモリロナイトに対する液相の量が増えている、ということになり、解析では空隙率、すなわち空隙水量は変化せず（固相が溶解しないと空隙が大きくなる）、イオン交換だけがおきていることになるため、この差が生じたことも考えられる。試験では、膨潤した分 固相（モンモリロナイト）の体積が大きくなっており、層間水が増えているとも、液相中に分散しているとも考えられるために交換率に差が出ているとすれば、体積変化（モンモリロナイトが分散する効果）をモデル化することが必要となる。

表 3.3.2-11 解析結果_Kd-実験より求めた値（液組成）

	NaCl	KCl	CaCl ₂	MgCl ₂
Na	4.54E-01	4.46E-01	3.15E-01	3.04E-01
K	1.13E-03	4.29E-02	1.04E-03	9.95E-04
Ca	8.80E-03	2.20E-02	1.09E-02	7.26E-03
Mg	4.51E-05	1.06E-04	3.87E-05	1.83E-04
Al	1.73E-09	5.29E-09	2.92E-09	1.79E-09
S	7.90E-06	1.40E-05	1.40E-05	1.40E-05
Cl	4.60E-01	5.10E-01	3.20E-01	3.00E-01
Si	2.81E-04	2.75E-04	2.92E-04	2.94E-04

表 3.3.2-12 解析結果_Kd-TRU2[3]（液組成）

	NaCl	KCl	CaCl ₂	MgCl ₂
Na	4.07E-01	3.62E-01	2.67E-01	2.56E-01
K	1.86E-03	6.03E-02	1.62E-03	1.54E-03
Ca	2.74E-02	4.82E-02	2.98E-02	1.95E-02
Mg	2.56E-03	4.09E-03	1.94E-03	9.05E-03
Al	1.31E-09	5.46E-09	2.59E-09	1.46E-09
S	7.90E-06	1.40E-05	1.40E-05	1.40E-05
Cl	4.60E-01	5.10E-01	3.20E-01	3.00E-01
Si	2.80E-04	2.74E-04	2.91E-04	2.93E-04

表 3.3.2-13 解析結果_Kd-実験より求めた値 (イオン交換サイト量[meq/100g])

イオン交換サイト	NaCl	KCl	CaCl ₂	MgCl ₂
NaZ	42.31	27.43	31.95	32.31
CaZ2	23.66	25.16	34.01	24.72
KZ	0.55	13.90	0.56	0.56
MgZ2	2.16	2.15	2.16	11.09

表 3.3.2-14 解析結果_Kd-TRU2 (イオン交換サイト量[meq/100g])

イオン交換サイト	NaCl	KCl	CaCl ₂	MgCl ₂
NaZ	43.90	30.31	33.58	33.97
CaZ2	22.26	23.15	32.52	23.67
KZ	0.53	13.30	0.54	0.54
MgZ2	1.98	1.88	2.03	10.48

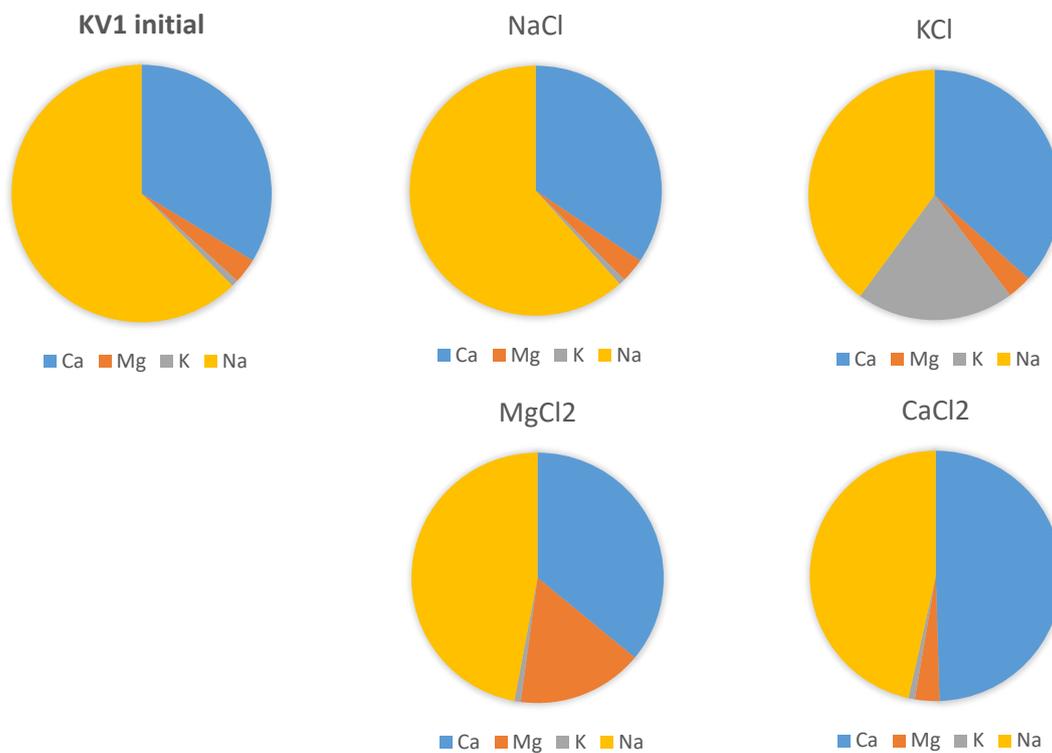


図 3.3.2-13 交換性陽イオン組成_解析結果_Kd-実験より求めた値 (meq/100g の割合)

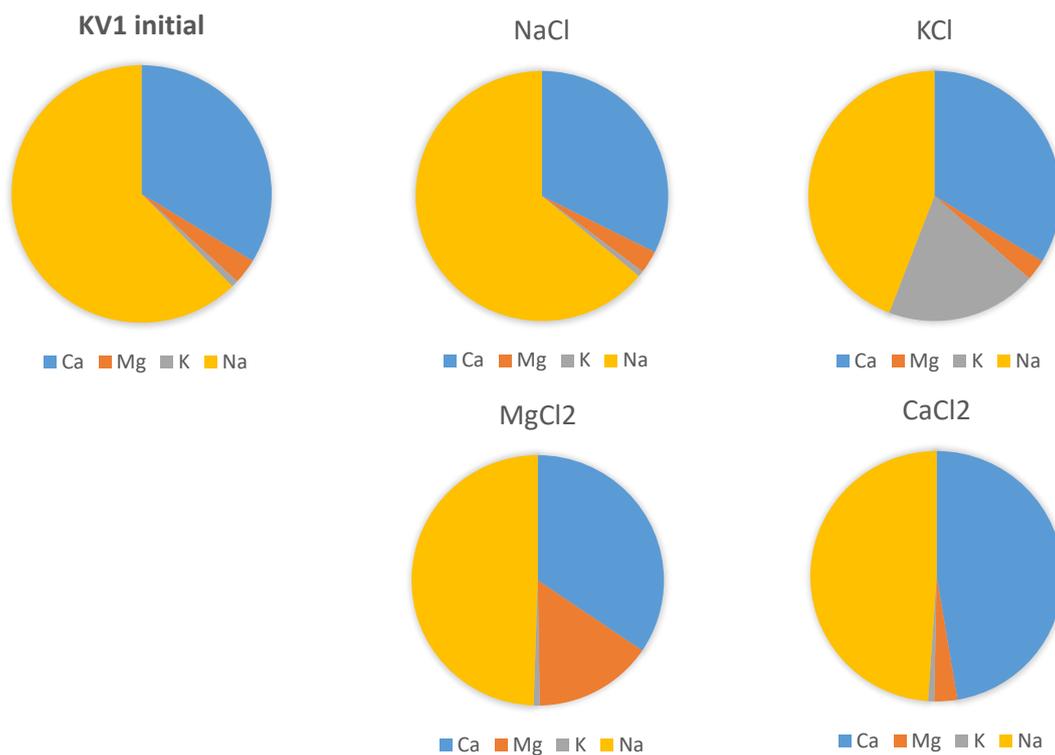


図 3.3.2-14 交換性陽イオン組成_解析結果_Kd-TRU2[3] (meq/100g の割合)

(4) XRD 分析

間隙水組成を分析した乾燥固相試料の一部を用いて、通常の定方位処理と完全不定方位処理した試料における XRD 測定を実施した。前者については、風乾試料とその EG(エチレングリコール)蒸着試料を測定し、後者については測定データをリートベルト解析した。

1) 定方位測定

図 3.3.2-15 には測定結果を示す。Me²⁺イオンが最も d₀₀₁ 回折ピークは面間隔が大きい方へシフトしている。これは価数が大きな陽イオンでは水和構造が異なり、層間サイトではより多くの水分子により配位されて (水和して) 存在していることを表している。特に MgCl₂ 浸漬試料では面間隔の増大が大きいことから Mg の水和は強いことがわかる。この試料は、その後の EG 処理したもので測定をしているが、d₀₀₁ ピークは全て同じ値に収束しており、モンモリロナイトの層構造とその周期性はイオン交換後も維持されていることがわかる。

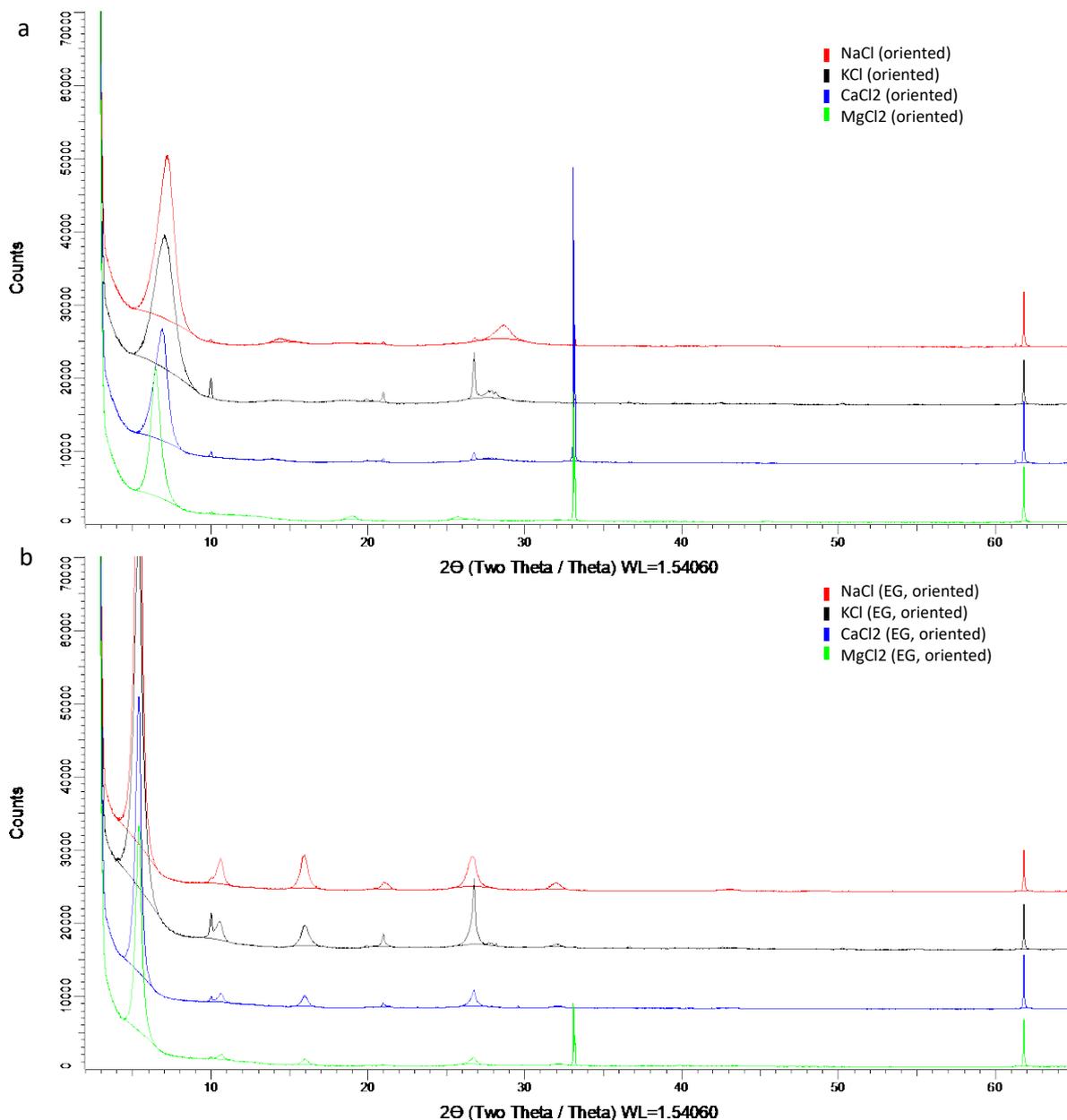


図 3.3.2-15 イオン交換ベントナイト試料の XRD 測定(a: 定方位測定 ; b: EG 処理測定)

2) 不定法位測定

完全不定法位処理を行った試料の XRD データはリートベルト解析に用いた。各浸漬溶液ごとに図 3.3.2-16 から図 3.3.2-19 に結果を示す。NaCl および KCl 溶液浸漬のベントナイト試料（ゲルフロントから回収）はモンモリロナイトが非常に乏しくなっていることがわかる。これに対し、CaCl₂, MgCl₂ 系ではモンモリロナイト率が高く、膨潤過程の鉱物の分別効果が小さいと思われる。これらの結果から、同じイオン強度の溶液での膨潤挙動の違いはないと思われていたが、今回の定量分析による評価では、ベントナイト中の他の随伴鉱物に対するモンモリロナイトの分別効果として反映されている可能性が出てきた。この挙動の特徴は、溶液種によっては、膨潤後のモンモリロナイトのコロイドやゲルとしての移動性に関わ

るため、今後、処分場環境の変遷に伴う緩衝材のベントナイトの耐久性を評価する上で重要になる可能性もあると考える。

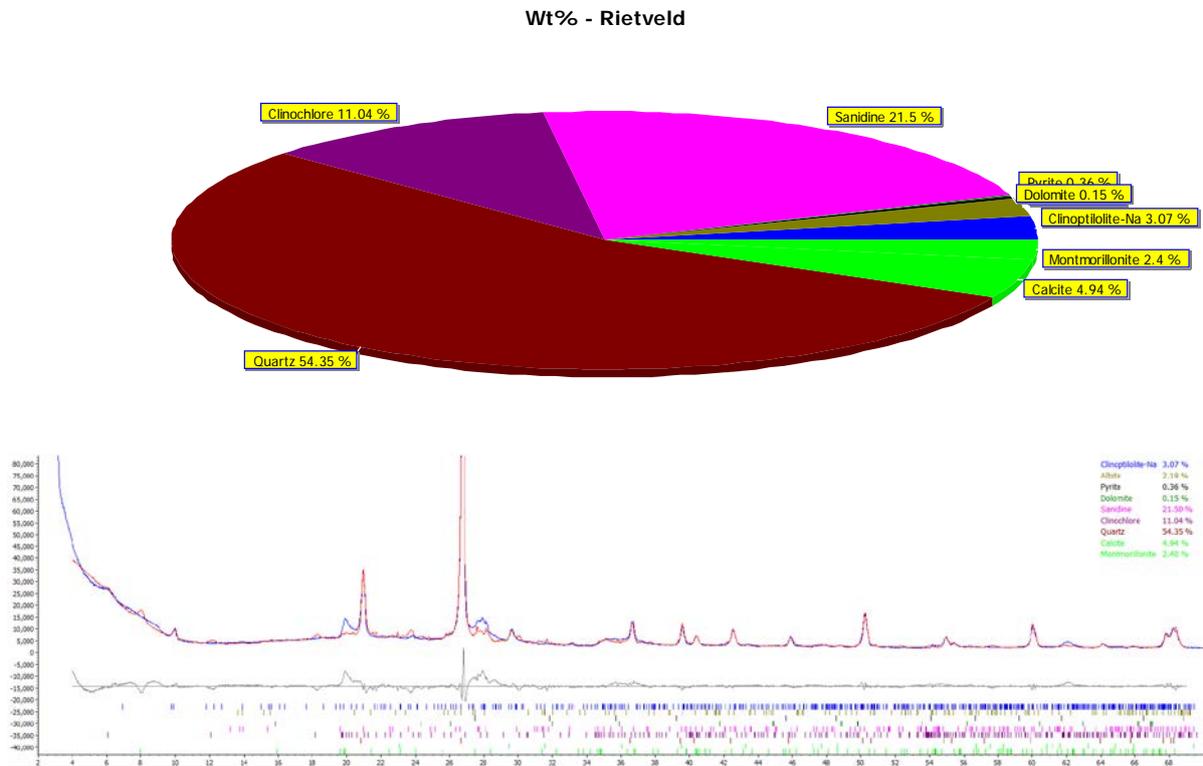


図 3.3.2-16 NaCl 浸漬試料の XRD リートベルト解析

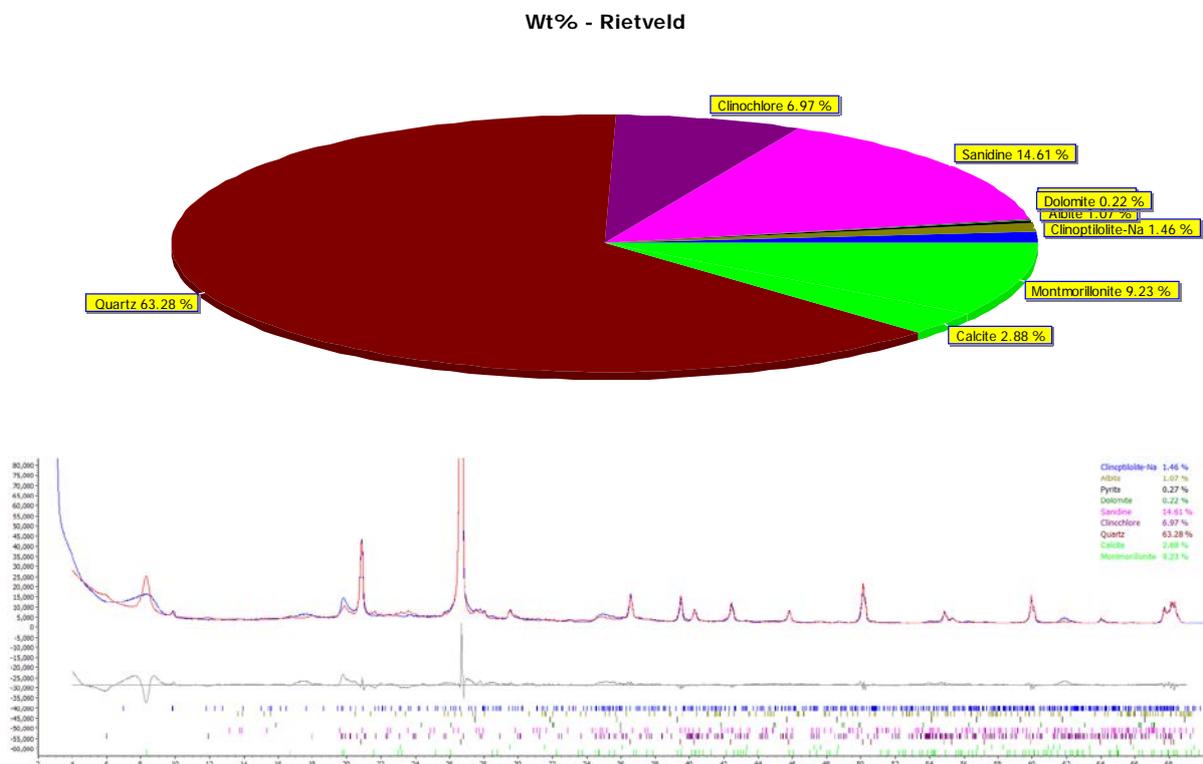


図 3.3.2-17 KCl 浸漬試料の XRD リートベルト解析

Wt% - Rietveld

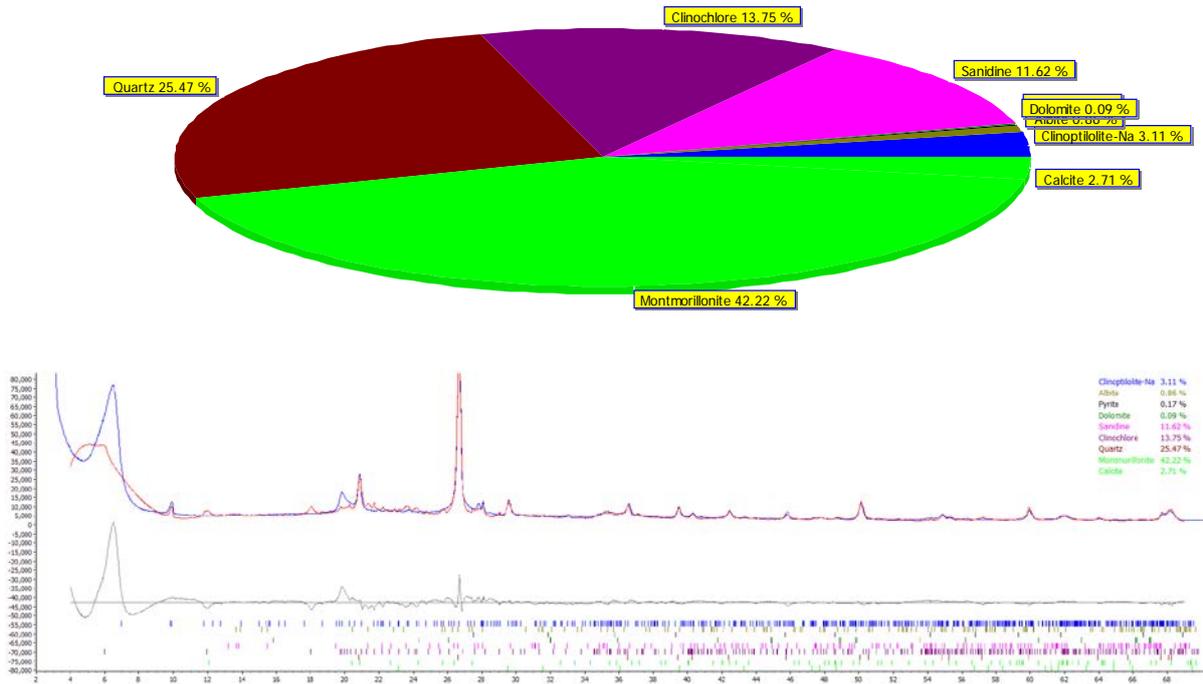


図 3.3.2-18 CaCl₂ 浸漬試料の XRD リートベルト解析

Wt% - Rietveld

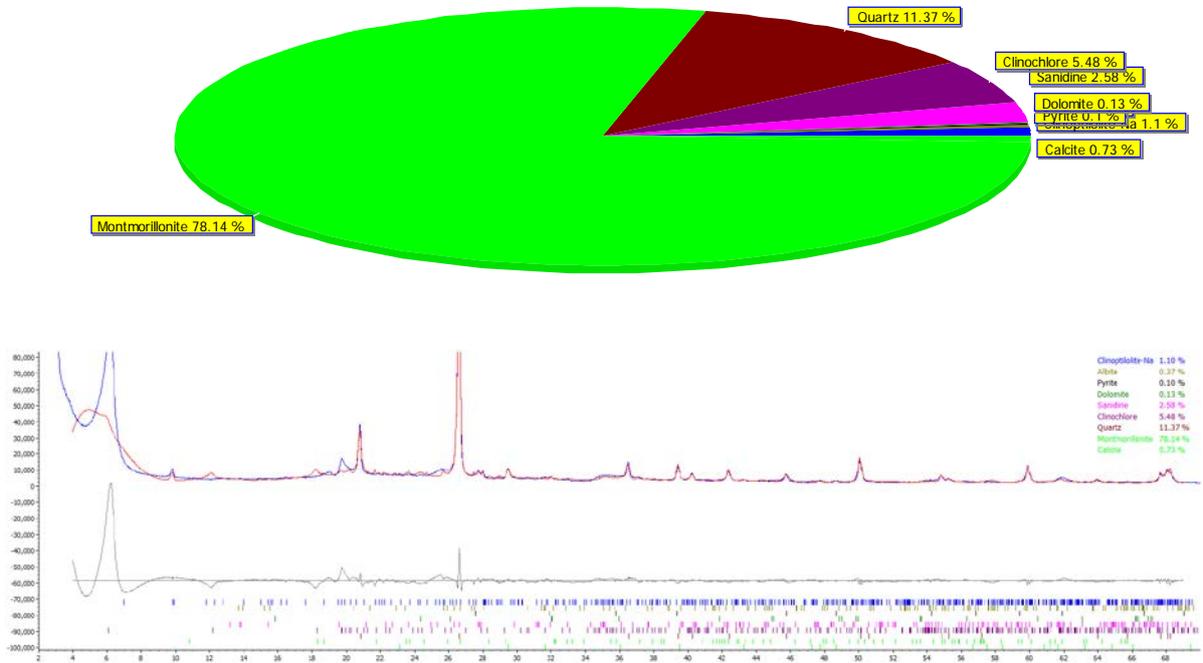


図 3.3.2-19 MgCl₂ 浸漬試料の XRD リートベルト解析

第3章 参考文献

- [1] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 27 年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書 (第 2 分冊), 2016
- [2] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 28 年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書 (第 2 分冊), 2017
- [3] 電気事業連合会 核燃料サイクル開発機構：TRU 廃棄物処分技術検討書 - 第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発とりまとめ-, 2005.

第4章 緩衝材の流出に関する検討

4.1 緩衝材流出に関する室内試験

4.1.1 試験の目的および概要

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設は多重バリア構造を基本としており、オーバーパック、ベントナイト系人工バリア（緩衝材）、天然バリアなどで囲まれた構造になっている。このような緩衝材表面近傍は、再冠水時に水みち形成（パイピング）や浸食（エロージョン）が発生する可能性が指摘されており、これらの現象により緩衝材がその性能を損ねるほどの量が流出した場合、人工バリアの長期性能に影響を与える可能性がある。

例えば、SKB 社では、ベントナイトブロックと天然バリアの間を充填するペレットのバルク密度をパラメータとした浸潤解析を実施して、界面付近のモデル化を行っている[14]。また、SKB 社の処分概念では、緩衝材と天然バリアの間はペレットで充填されるため、ある厚さを持った界面近傍のペレットのモデル化や浸潤位置をパラメータとした浸潤解析がなされている。さらに、SKB 社では、SKB 社 Report R-06-80[15]やSKB 社 Report R-06-72[16]において、パイピングに関する実験的な検討を行っている。

そこで本検討では、以上の既往の検討を踏まえ、緩衝材のパイピングやエロージョンに関する現象およびその工学的対策に関する知見を得ることを目的として、室内試験による検討を行ってきた（昨年度までに実施した試験詳細については、過年度の報告書[17]～[20]を参照にされたい）。以下、本年度実施した試験内容の詳細を述べる。

4.1.2 ケイ砂含有率の影響評価

(1) 試験概要

緩衝材流出現象に関する試験において、緩衝材に含まれるケイ砂が水みちに堆積し、緩衝材の膨潤によるシールを阻害する状況が観察されている。また、堆積したケイ砂が水みち内で対流することで緩衝材を削り、流出を促進させている可能性もある。その一方で、海水系地下水を模擬した 1000mm セルによるパイピング試験[21]により、海水系地下水におけるエロージョン対策として、ケイ砂を隙間に充填することが有効である可能性も指摘されている。

このように、緩衝材の流出現象と緩衝材に含まれるケイ砂の存在は無関係ではなく、流出量等に影響があることが予想される。そこで、図 4.1.2-1 に示すようなアクリル製緩衝材流出試験セル（小型セル）を用いて試験を実施し、流出現象の低減、抑制のために適したケイ砂含有率を求める。

表 4.1.2-1 に試験ケースを示す。

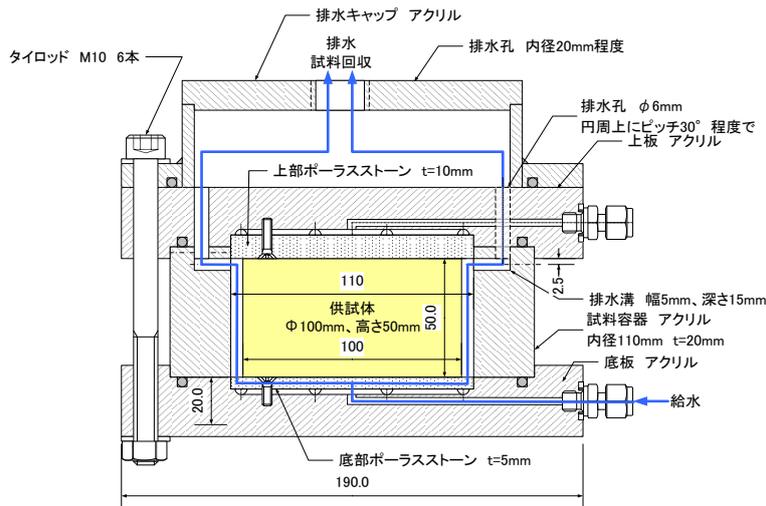


図 4.1.2-1 アクリル製緩衝材流出試験セル

表 4.1.2-1 エロージョン現象に対するケイ砂含有率の影響検討ケース

目的	液種	通水方向	配合 (wt%)	供試体	流速 L/min	試験項目
緩衝材流出現象へのケイ砂の影響把握と定量評価	H ₂ O	底面から上面	ベントナイト 100% (B100)	ブロック 乾燥密度 1.6Mg/m ³	0.1	<ul style="list-style-type: none"> 通水圧 ベントナイト流出量 流量 挙動の観察
			ベントナイト 90% ケイ砂 10% (B90S10)			
			ベントナイト 70% ケイ砂 30% (B70S30)			
			ベントナイト 50% ケイ砂 50% (B50S50)			

※ベントナイトにはクニゲル V1 を使用。

本検討では、試験ケースとして緩衝材ブロックのケイ砂含有率をパラメータとした流出試験を行い、総通水量とエロージョン質量の関係にケイ砂含有率が及ぼす影響を調べるとともに、流出試験中の水みちの形成過程にケイ砂が及ぼす影響についても定点撮影によって観察した。ケイ砂含有率は 0、10、30、50wt% である。供給する液体は脱イオン水とした。表 4.1.2-2 に各供試体の諸元を示す。表に示すように、供試体の直径 10cm に対してセルの内径が 11 cm となっており、供試体設置時にはセルと供試体の間には 5mm の隙間がある状態で試験を開始している。すべてのケースでこの隙間を膨潤でシールした時のバルクの乾燥密度が 1.6Mg/m³ となるように膨潤前のバルクの乾燥密度が 1.93Mg/m³ 程度になるように設定した。

表 4.1.2-2 エロージョン現象に対するケイ砂含有率の影響検討試験の供試体諸元

case	B100	B90S10	B70S30	B50S50
直径 (cm)	10.001	10.005	10.068	10.011
高さ (cm)	4.500	4.500	4.500	4.500
体積 (cm ³)	353.482	353.747	358.217	354.172
土粒子の密度 (Mg/m ³)	2.733	2.724	2.707	2.689
含水比 (%)	13.02	14.24	13.51	12.53
膨潤前乾燥密度 (Mg/m ³)	1.929	1.928	1.908	1.928
膨潤前有効ベント ナイト乾燥密度 (Mg/m ³)	1.929	1.871	1.704	1.515
膨潤後乾燥密度 (Mg/m ³)	1.595	1.594	1.598	1.597
間隙比 (—)	0.417	0.413	0.419	0.395
飽和度 (%)	85.41	93.89	87.32	85.39
試験容器内径 (cm)	11.000	11.000	11.000	11.000

(2) 試験前後の供試体の目視観察結果

図 4.1.2-2 には試験前の供試体、図 4.1.2-3 には試験後の供試体の状況を示す。図 4.1.2-3 の上面写真より、B100 や B90S10 のようなベントナイト含有率の高い（ケイ砂含有率が低い）ケースにおいて、試験前には見られなかった亀裂が、試験後の供試体の円周方向に発生していることが分かる。また、試験後の供試体断面から、この亀裂は供試体を高さ方向に貫通しており、亀裂の発生個所が浸潤面近傍であることが分かる。また、B100 や B90S10 では浸潤面の境目が不明瞭なのに対して、B70S30 や B50S50 では浸潤面の境目が明瞭である。表 4.1.2-2 に示したように、試験前の供試体の有効ベントナイト乾燥密度は B100 や B90S10 において非常に高く、サクションが高いために飽和度の遷移領域が長く浸潤面の境界が不明瞭となっているのと同時に、この高いサクションが解放されることによって亀裂が発生しているものと考えられる。一方、B70S30 や B50S50 では試験前の供試体の有効ベントナイト乾燥密度が B100 や B90S10 に比べると相対的に低いため、サクションも相対的に低く、飽和度の遷移領域が短いため浸潤面の境界が明瞭となっているのと同時に、このサクションが低かったために解放されても亀裂が入らなかったものと考えられる。これらの観察結果から、この亀裂が浸潤による膨潤、および応力開放によるものであると考えられる。

また、B50S50 以外のケースにおいて水みちが形成され、流出現象が観察された。また、B50S50 のケースでは、初期に設けた隙間を膨潤でシールすることができず、流出現象が観察された。観察の結果、ケイ砂含有率が小さいほど、水みちの断面積が小さいという結果となった。B50S50 以外のケースで複数の水みちが残ったが、これは試験時間を最大で 1 日としたためで、試験時間を延長すれば 1 本の水みちに収斂したものと考えられる。

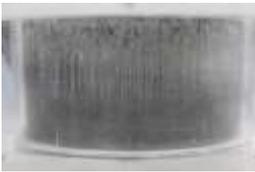
Case	B100	B90S10	B70S30	B50S50
上面				
側面				

図 4.1.2-2 エロージョン現象に対するケイ砂含有率の影響検討試験の試験前供試体

Case	上面	側面	断面
B100			
B90S10			
B70S30			
B50S50			

図 4.1.2-3 エロージョン現象に対するケイ砂含有率の影響検討試験の試験後供試体

図 4.1.2-4 には、各供試体の試験中の経時変化を示す。図から、ケイ含有率が高いほど有効ベントナイト乾燥密度が低いために膨潤性能が小さく、水みちの断面積が大きくなっていることがわかる。

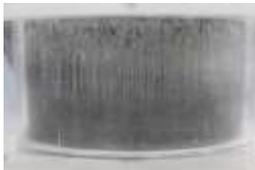
Case	B100	B90S10	B70S30	B50S50
0				
30				
60				
120				
240				
480				
960				
1440				

図 4.1.2-4 エロージョン現象に対するケイ砂含有率の影響検討試験中の供試体の経時変化

さらに、ケイ砂含有率が高いケースでは水みちの断面積が大きいために、流速が小さく、その結果として、ケイ砂は沈殿しベントナイトによる隙間の修復を阻害する可能性があることが分かった。この傾向はケイ砂含有率が 50wt% の場合に顕著であり、緩衝材以外の埋め戻し材に止水性を期待する場合でベントナイト混合土のケイ砂相当の土の含有率が 30wt% よりも大きくなる場合には、ベントナイトの選択的な流出とケイ砂の沈殿による自己シールの阻害に対する検討を実施する必要がある。

(3) エロージョン現象に対するケイ砂含有率の影響検討試験結果

図 4.1.2-5 には、通水圧と通水量の経時変化を示す。図から、試験中、流量が計画通り 0.1L/min に制御されていることが分かる。さらに、水みちの断面積が小さいケイ砂含有率が小さなケースほど通水圧が大きくなる傾向があった。ただし、B50S50 のケースでは、膨潤に伴う水みちの形成（パイピング）は観察されなかったが、ケイ砂が隙間に堆積したために、間隙率が減少し、通水圧が大きくなったと考えられる。

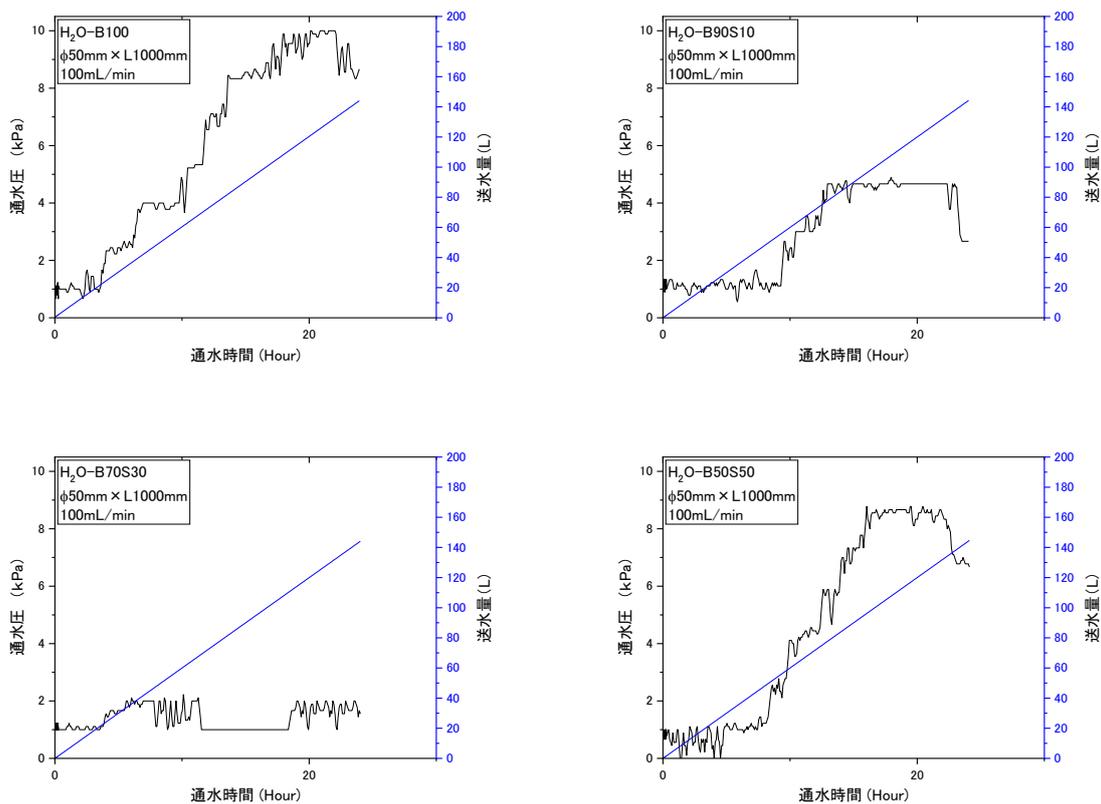


図 4.1.2-5 通水圧と通水量の経時変化

図 4.1.2-6 には、すべてのケースの総通水量とエロージョン質量の関係を示す。図には、これまでに本検討と同じクニゲル V1 単体のペレット充填供試体、クニゲル V1 ブロック供試体、さらにクニピア F 単体供試体に対して実施したエロージョン試験から得られた総通水量とエロージョン質量の関係も併せて示す。図から、総通水量とエロージョン質量の関係に対するケイ砂含有率

の影響は小さいことが分かる。これは、これまでの検討で明らかになっているように、モンモリロナイトが選択的に流出するためであると考えられる。ただし、ケイ砂含有率に関係なく同じ速度でモンモリロナイトが流出するとすると、その影響はケイ砂含有率の大きなものほど大きいと言える。また、本試験ケースにおいても、総通水量とエロージョン質量の関係は両対数軸で同じ勾配の直線に収束することが明らかとなった。なお、既往の研究と本検討の各総通水量とエロージョン質量の関係のズレは、試験系の隙間や配管の容積などの違いによって生じるものであり、同じ緩衝材（モンモリロナイト）であれば、総通水量とエロージョン質量の関係において勾配が同じであるという事実が得られた。このことは、この勾配が材料固有のものであるということを示唆している可能性がある。

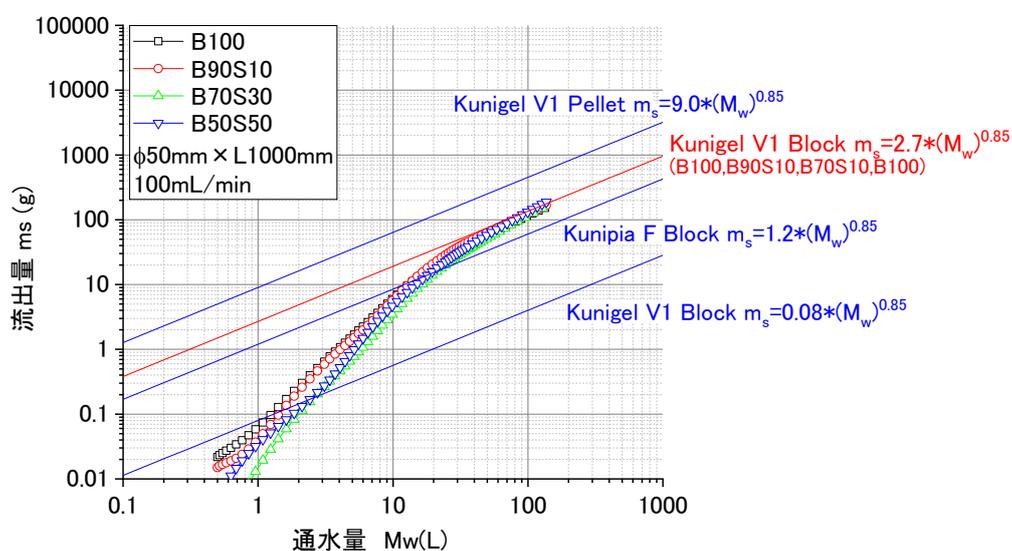


図 4.1.2-6 総通水量とエロージョン質量の関係に対するケイ砂含有率の影響

4.1.3 高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験

(1) 試験概要

これまでの検討で、高レベル放射性廃棄物地層処分施設の再冠水期間において、緩衝材流出現象が発生することにより、処分施設の長期性能に影響を与える可能性があることが示された。これらの検討によれば、緩衝材への浸潤速度（量）と湧水量の大小関係で緩衝材が流出するかどうかに対して重要であることが明らかとなってきている。その一方で、実際の処分場は、高水圧で低流量となる天然バリアに構築されることが予想される。このような環境では、水圧一定環境下で流量が変化するため、実処分環境を模擬した試験条件での緩衝材流出現象を評価することも重要である。

また、実処分場の環境を模擬した試験を実施して緩衝材の流出が発生しない湧水量の条件を示すことができれば、緩衝材流出現象から緩衝材の性能を担保するための天然バリアの性能（透水係数や空隙率など）を示すことも可能となる。そこで、図 4.1.3-1 に示すような 2 重セルを用いた圧力一定通水試験を実施し、実処分環境下での緩衝材流出現象の定量評価や流出しない天然バ

リアの条件を取得した。表 4.1.3-1 に本年度実施した試験ケースを示す。

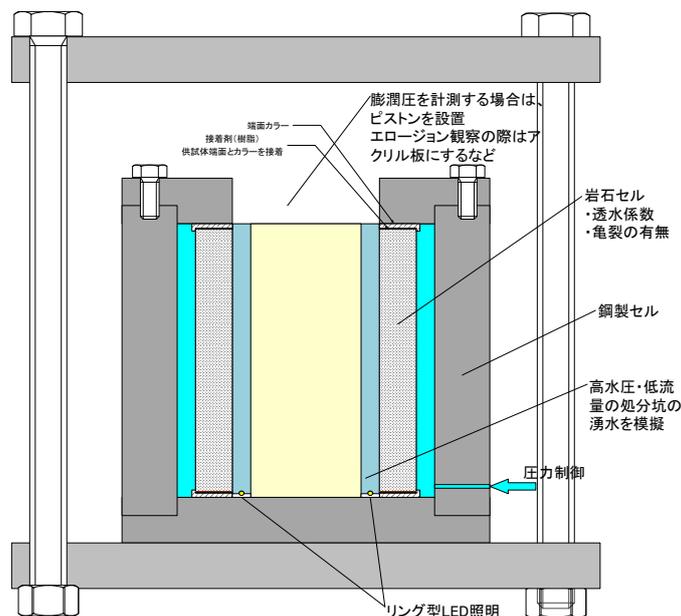


図 4.1.3-1 2重セルを用いた高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験イメージ

表 4.1.3-1 圧力一定条件下での緩衝材流出試験ケース

目的	液種	外圧	内圧	内セル	供試体	試験項目
一定水圧下での緩衝材流出現象の把握と定量評価	H ₂ O	1~3MPa程度	大気圧相当	多孔質体 透水係数 10 ⁻⁸ m/s 相当	膨潤後の平均乾燥密度 1.6Mg/m ³ 程度のブロック	<ul style="list-style-type: none"> ・通水圧 ・ベンチ付流出量 ・流量 ・挙動の観察

図 4.1.3-2 に 2 重セルを用いた高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験装置を示す。図に示すように、試験装置は角型のセルであり、外セルと内セルの間には格子状のリブを設けてある。試験では、図 4.1.3-2(a)に見える格子状のリブの間と表面に多孔質板が設置され（図 4.1.3-3 参照）、多孔質板に高水圧を付与した際に多孔質板からしみ出る水（高水圧低流量）によって流出現象が発生するかどうかを確認した。多孔質板はセラミックス板を採用し、格子状リブの間の多孔質板の透水係数が $1.91 \times 10^{-7} \text{m/s}$ で厚さが 15mm（図 4.1.3-3 左）、前面に設置した多孔質板の透水係数が $1.78 \times 10^{-9} \text{m/s}$ 程度で厚さが 0.5mm とした。この多孔質板に対して通水試験を行い、実際の試験に用いる場合の有効通水面積に換算した場合、1.25MPa の通水圧で流量が概ね 100mL/min となることを確認して通水圧を決定した（図 4.1.3-4）。

本試験では、流出試験中の膨潤圧も計測するため、供試体上面には載荷板を設置し、載荷板と反力盤の間にロードセルを挟み込む構造となっている（図 4.1.3-2(b)）。試験の実施に際しては、水密試験を行い、高水圧に対して漏水がないことを確認した（図 4.1.3-2(c)）



(a) 試験セル

(b) 載荷板、モーターセルと反力盤

(c) 水密試験

図 4.1.3-2 2重セルを用いた高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験装置



図 4.1.3-3 多孔質板の設置状況

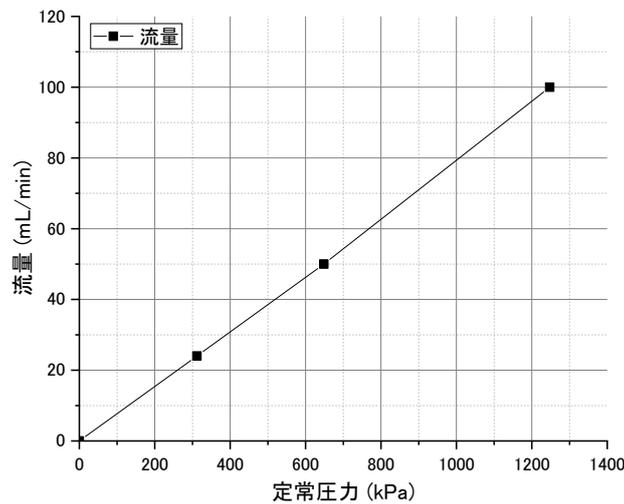


図 4.1.3-4 試験条件の設定のための通水試験

図 4.1.3-5 には、高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験用供試体作製フローを示す。供試体は5ブロック（高さ 150 mm×幅 300 mm×奥行 200mm×2 個、高さ 100 mm×幅 300 mm×奥行 200mm×3 個）に分けて図 4.1.3-5 (a)の 2000kN アムスラーを用いて作製した。1つのブ

ロックに付き、図 4.1.3-5 (b)～(f)の手順を繰り返した。

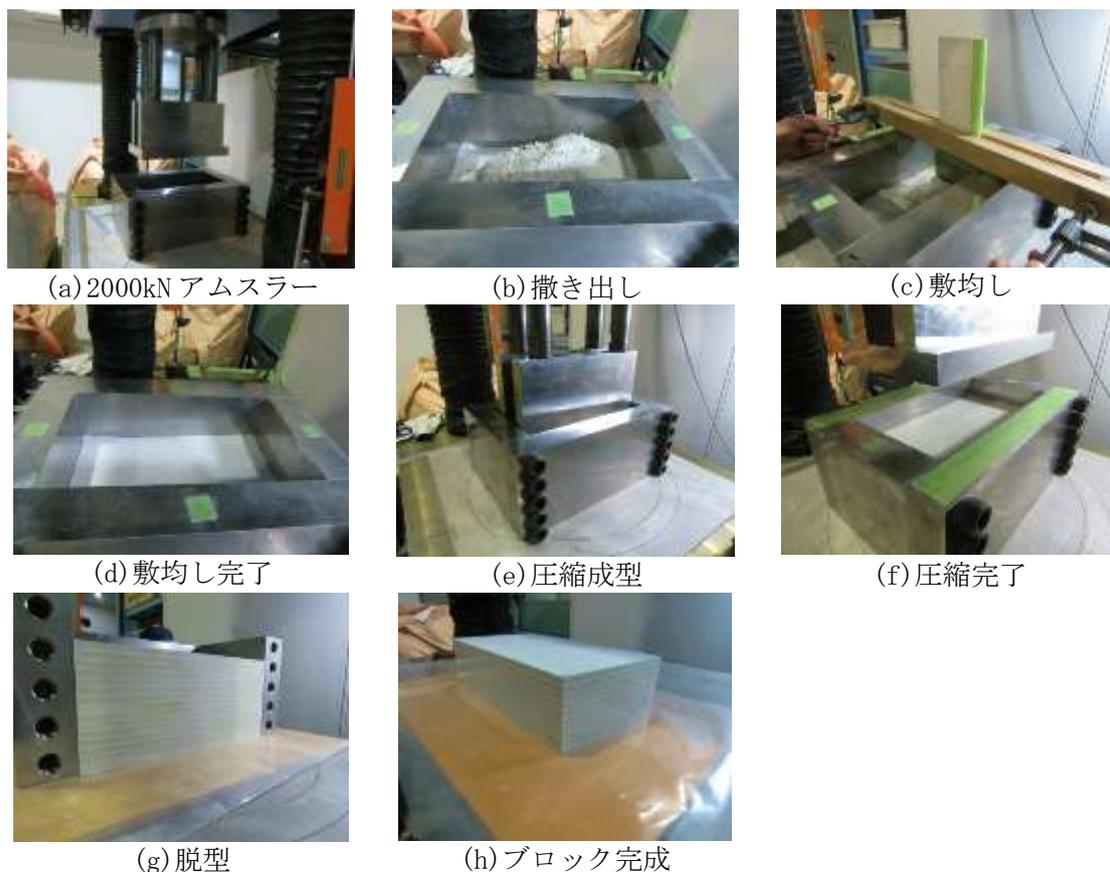
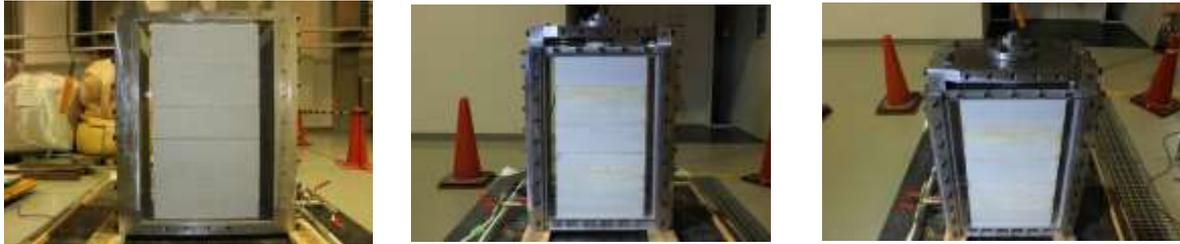


図 4.1.3-5 高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験用供試体作製フロー

図 4.1.3-6 には、高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験の供試体完成状況を示す。供試体は、5つに分割したブロックを積み上げて作製した。また、各ブロックは仕上がり厚さ 10mm となるように静的に締固めて作製した。供試体と多孔質体の隙間は左右とも 25mm 程度であり、供試体が膨潤してこの隙間を流出なしでシールすると、膨潤後の乾燥密度が 1.6Mg/m^3 となるように設定した。高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験用供試体の諸元を表 4.1.3-2 に示す。

図 4.1.3-7 (a)～(c)には、高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験の計測機器を示す。試験では、流出現象中の膨潤圧を計測するために、供試体上面の上蓋と拘束盤の間に 5 個のロードセルを設置した。さらに、排水口は角型のセルの四隅と短辺の midpoint の 6 か所に設けた(a)。試験が始まるとすぐにアクリル面の変形を抑えるために、角型セルの四隅のみを見えるようにしてアクリル面に拘束板を設置した(b)。排水は、(c)に示す 500L タンクに 2~3 日分を溜め置いて、十分に攪拌した後に 100cc 程度採水して、吸光度計測に供した。この間の吸光度が一定だったと仮定して、ベントナイトの流出量を換算した。



(a) 供試体の設置（背面） (b) 供試体の設置（全面） (c) 反力盤

図 4.1.3-6 高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験供試体

表 4.1.3-2 高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験用供試体諸元

ブロック No		1	2	3	4	全体
作成時供試体	幅 (cm)	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0
	奥行 (cm)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
	高さ (cm)	15.0	15.1	14.9	14.9	59.9
	体積 (cm ³)	9900.0	9949.5	9850.5	9850.5	39550.5
	湿潤質量 (g)	20138.8	20130.4	20137.7	2013800	80545.7
	乾燥質量 (g)	18240.0	18240.0	18240.0	18248.5	72968.5
	土粒子密度 (Mg/m ³)	2.707	2.707	2.707	2.707	2.707
	含水比 (%)	10.41	10.36	10.40	10.36	10.38
	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.842	1.833	1.852	1.853	1.845
	間隙比 (---)	0.469	0.477	0.462	0.461	0.467
飽和度 (%)	60.1	58.9	61.0	60.8	60.2	
膨潤時供試体	幅 (cm)	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0
	奥行 (cm)	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
	高さ (cm)	15.0	15.1	14.9	14.9	59.9
	体積 (cm ³)	11400.0	11457.0	11343.0	11343.0	45543.0
	乾燥密度 (Mg/m ³)	1.600	1.592	1.608	1.609	1.602
	間隙比 (---)	0.692	0.700	0.683	0.683	0.690



(a) 上面のロードセル（5 個）と排水口（6 個）

(b) アクリル拘束板

(c) 排水タンク

図 4.1.3-7 高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験計測装置

(2) 試験結果

図 4.1.3-8 に高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験の状況を示す。試験では、内セルである多孔質板に水圧をかけた状態で、内セルから滲み出る水により流出現象が発生するかどうかを観察するものであるが、水圧を段階的に増加させた。目標の通水圧は、前述の通り、多孔質板の透水係数に鑑みて 1.25MPa とした。また、この際の片面からの湧水量は 50mL/min であり、左右の面を合計すると 100mL/min となるように設定した。なお、左右の通水管は 1 本の配管を分岐しているために連通しており、両面ともに 1.25MPa の通水圧が常に作用している。このため、仮に片面が閉塞しても湧水量が半分減るだけで通水圧が変化することはない。一方、これまで実施してきた流量制御で当試験を行った場合、仮に片面が閉塞すると、もう一面から倍の湧水が流れることになるため、通水圧もその分増加する。このように、圧力制御で試験を実施した場合、流量制御と比べ、閉塞した際の通水圧の変化が逆転することになる。実際の処分場における亀裂なども互いに連通していることが予想されるため、この条件設定は、実処分場における湧水の条件に類似しているといえる。

図に示すように、片側の隙間の容積が 3L(60×20×2.5mL)であるため、水が満たされるまでに、多孔質板の飽和に掛かる時間も含めて 2 時間弱を要した。その後、供試体が膨潤し、1 か月程度で隙間が目視では観察できなくなった。これは全ての四隅で同様であった。

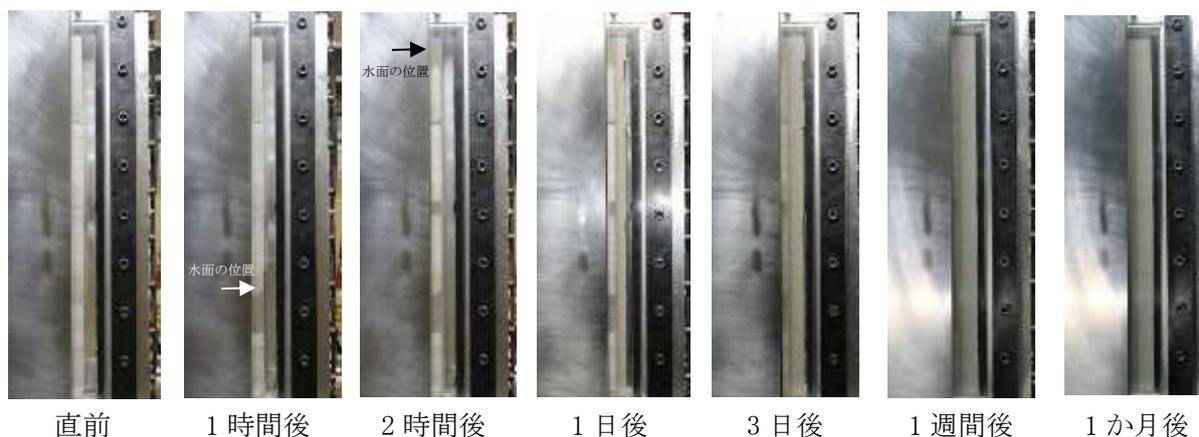


図 4.1.3-8 高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験状況

図 4.1.3-9 には、通水圧と通水量の経時変化を示す。図から、盛替え時に通水圧の増減があるものの、概ね 1.25MPa の通水圧を一定に保っていることが分かる。一方、総通水量はほぼ一定割合で増加しているものの、その勾配は時間とともに減少傾向を示していることが分かる。図 4.1.3-10 には、両面からの湧水量の総和の経時変化を示す。図からも、試験開始当初は 90mL/min の湧水量が計測されていたが、時間とともに減少し、両面合わせて 50mL/min 程度で収束している。このことは、実際の処分場においても緩衝材の膨潤により、ある程度の湧水量を抑制できる可能性があることを意味している。

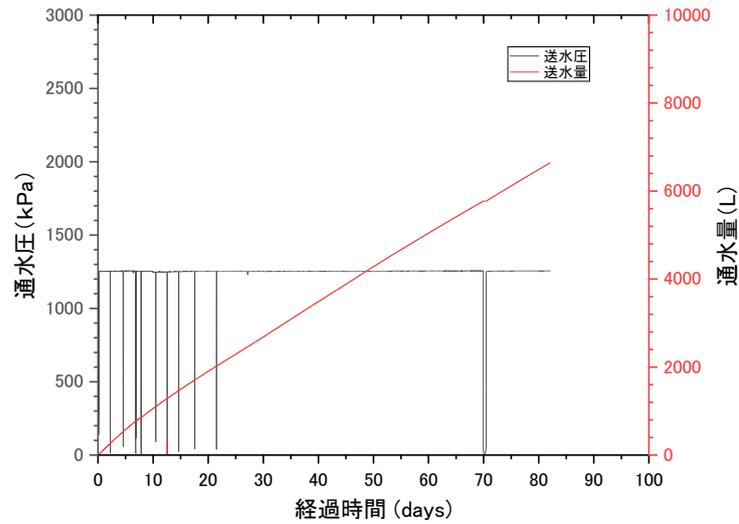


図 4.1.3-9 通水圧と総通水量の経時変化

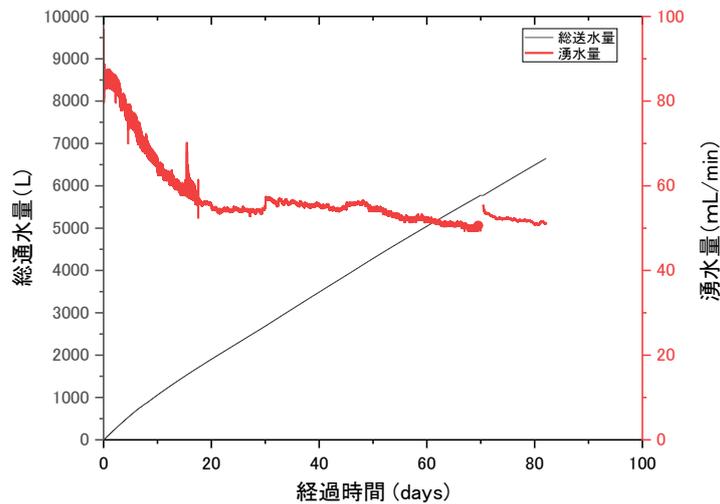


図 4.1.3-10 通水量と湧水量の経時変化

図 4.1.3-11 には、膨潤圧の経時変化を示している。膨潤圧は試験開始から増加し続けたが、徐々にその勾配が減少している。図には、小林ら(2007)[22]による完全飽和線の式に供試体が完全に膨潤した後の有効ベントナイト乾燥密度 1.37Mg/m^3 を代入して求めた膨潤圧も併せて示している。図から膨潤圧は完全飽和線から求めた膨潤圧よりも大きくなっているが、これは供試体内に飽和度分布や密度分布がある状態で膨潤圧を発揮しているためであると考えられる。仮に密度差が解消され均質な状態になれば、摩擦などの影響により、膨潤圧はこの完全飽和線から求めた膨潤圧よりも小さくなるものと考えられる。

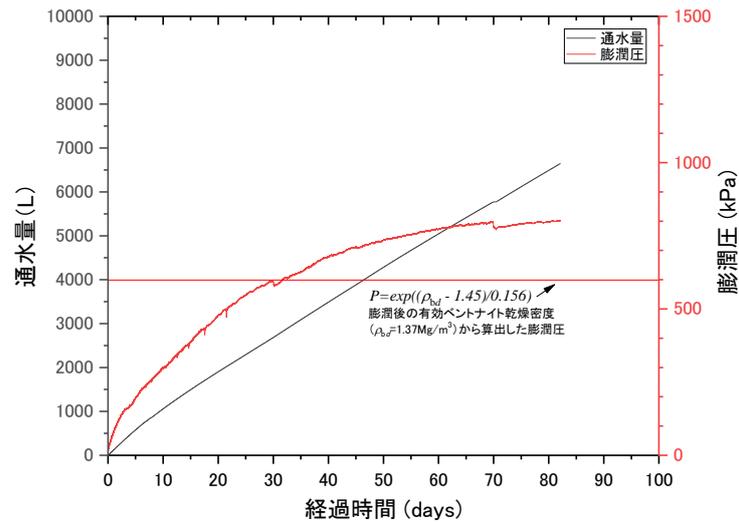


図 4.1.3-11 通水量と膨潤圧の経時変化

図 4.1.3-12 には、総通水量とエロージョン質量の関係を示す。図には、同規模のエロージョン試験結果として工学規模エロージョン試験の総通水量とエロージョン質量も併せて示す。本試験では、通水量が時間経過に伴って減少していることから、勾配は緩くなっている。ただし、総通水量とエロージョン質量の関係で比較すると、工学的対策を施した工学規模エロージョン試験の結果と概ね同じ傾向でデータが推移している。このことから、湧水量が低下しても緩衝材が膨潤して限界流速になるまで水みちの断面積を小さくするため、水みちを流れる液体のモンモリロナイト濃度は一定であり、その結果として総通水量とエロージョン質量の関係は変化しないものと考えられる。

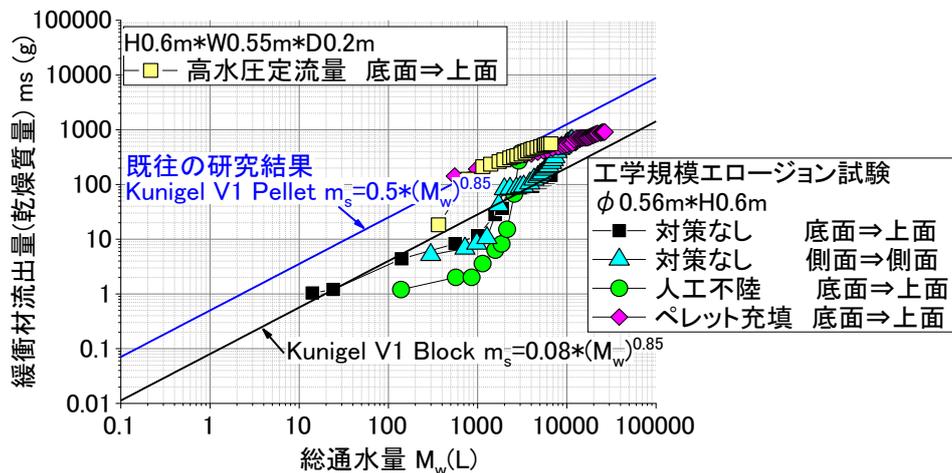


図 4.1.3-12 高水圧低流量下における総通水量とエロージョン質量の関係

4.1.4 亀裂を有する模擬岩盤の流出試験

(1) 試験概要

本検討で実施した緩衝材の流出検討では、供試体寸法に対しては十分に小さいながらも、ベン

トナイトの粒子径に対しては必ずしも小さいとは言えない5mm程度の排水口が設置されていた。仮に、再冠水期間の間、処分孔をしっかりと密封できる蓋を設置して、反力梁の設置やアンカーの設置、さらに先行埋め戻しといった工学的な対策で流出を防止することを考えると、この数mmという隙間からの流出はかなり保守側の設定ともいえる。

一方、通常、高レベル放射性廃棄物処分場が建設される300m以深の地盤では、結晶質岩だけでなく、堆積岩でも掘削などの力学的な変化によって、孔壁近傍では亀裂が発生することが予想される(EDZ)。仮に、処分孔をしっかりと密封できたとしても、処分孔に発生した亀裂から緩衝材が流出することも考えられる。この亀裂は、ベントナイトの粒子径に対して、亀裂幅は十分に小さいと考えられるものから粒子が流出できる程度のものまで様々であると考えられる。このような、亀裂からの流出挙動や亀裂内での流出した緩衝材の挙動を把握することは、この不可避処分孔の亀裂に対してプレグラウトなどの工学的対策を講じる必要の有無を判断する上で重要である。

そこで、亀裂を有する岩盤での処分孔を模擬して、図4.1.4-1に示すようなアクリル製試験セルを用い、緩衝材流出試験を実施した。このセルには排水口は設置されておらず、通水された水はアクリル同士の界面の隙間(模擬亀裂)から排水される。試験では、液種や亀裂の幅と流路の形状などがパラメータとして考えられる。亀裂幅は、図4.1.4-1に示したセルを構成するアクリル板の間にスペーサーを挟み込んで制御することとした。さらに、図4.1.4-2に示すように、流速が半径方向に一定のケース(直線ケース)、流路の形状を最短流路と最長流路の差が大きい場合(屈曲ケース)、流路の面積に大きな差がある場合(収斂ケース)、両者の複合ケースなどもスペーサーを用いて制御できる。また、スペーサーを挟み込まない平面ケースも実施可能である。

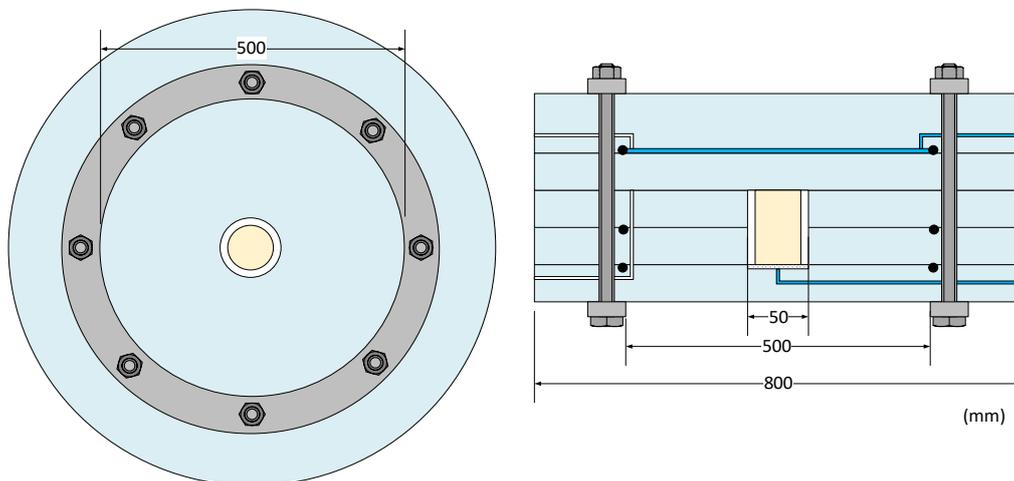


図 4.1.4-1 隙間を有するアクリル製流出試験セルのイメージ

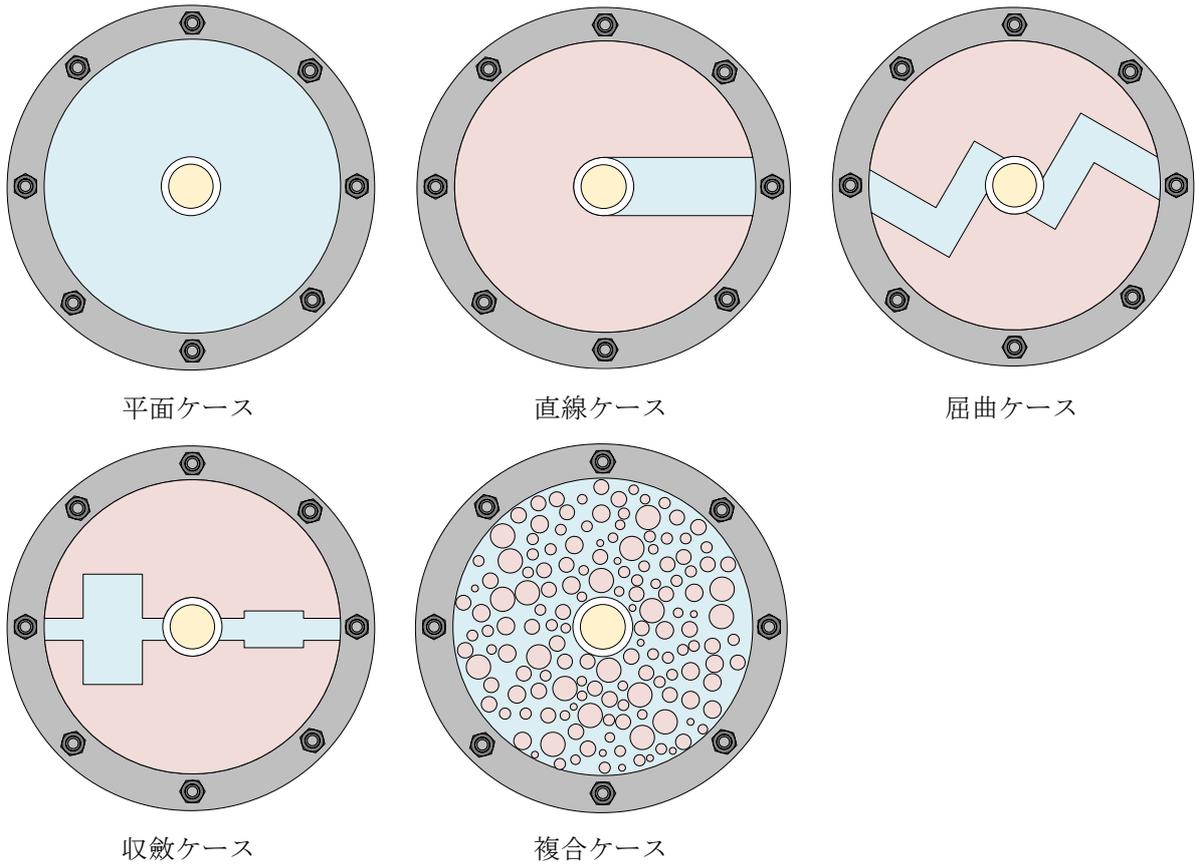


図 4.1.4-2 隙間を有するアクリル製流出試験セルの流路形状イメージ

本年度実施する試験ケースは、スペーサーなし、流量 100mL/min、イオン交換水を用いて実施した予察試験から設定した。

図 4.1.4-3 に予察試験結果を示す。予察試験は 3 時間程度の通水時間であったが、供試体の周りが流出し、流出した緩衝材が隙間で円周状に沈殿していることが観察された。これは、図 4.1.4-3 の下図に示すように、100mL/min で通水した場合、円盤の中心部では流速が早く、半径方向になるほど流速が遅くなるためであると考えられる。また、本試験条件の場合、亀裂幅 1 mm 以下では通水圧が 3MPa を越えてしまうことも明らかとなった。

以上の予察試験結果から、本年度実施する試験ケースを表 4.1.4-1 のようにした。長期的な流出現象を把握するために亀裂幅は 1 mm に固定した。また、予察試験の結果、半径方向に流速が小さくなることにより、流出物質が亀裂内で円周状に堆積する現象が観察されたため、図 4.1.4-2 に示す平面ケースと直線ケースを実施し、流速が亀裂内の流出物質の堆積に及ぼす影響について検討を行うこととした。さらに、別途、幌延深地層研究センターで実施されている流出試験と結果を比較するために、深地層研究センターの地下水と同等のイオン強度の NaCl 水溶液を用いて平面ケースも実施することとした。

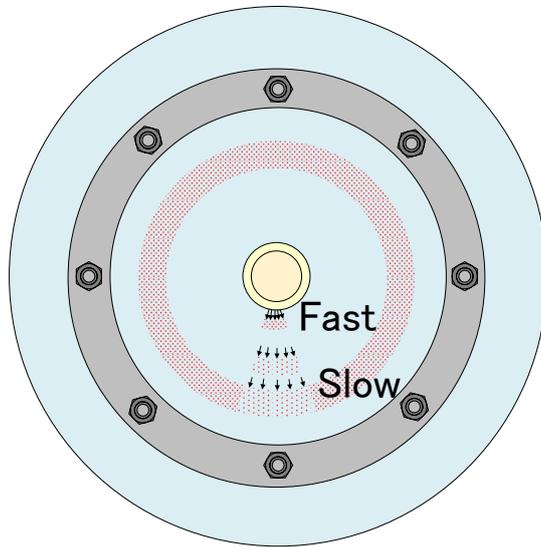


図 4.1.4-3 予察試験結果

表 4.1.4-1 模擬結晶質岩盤の流出試験検討ケース

目的	液種	イオン強度	流速 mL/min	最大 通水圧 MPa	隙間の 間隔(mm)	流路 形状	供試体	試験項目	給排水 箇所
緩衝材流出現象への亀裂の影響把握	H ₂ O	0	100	3	1	平面	膨潤後の平均乾燥密度 1.6Mg/m ³ 程度のケイ砂 30wt% 含有ベントナイトブロック	通水圧 ベントナイト流出量 流量 挙動の観察	底面 →亀裂
						直線			
	NaCl 水溶液	0.5				平面			

既往の研究（JNC-TN8400 2004-026 松本 一浩*；棚井 憲治：緩衝材の流出/侵入特性(II)-幌延地下水(HDB-6 号孔)を用いた緩衝材の侵入特性評価）によれば、図 4.1.4-4 に示すような試験装置において、亀裂に蒸留水や幌延地下水を供給し、流れのない場で亀裂に緩衝材が浸入する状況を観察しモデル化している。亀裂幅は 0.5mm、1.0mm、1.5mm で、乾燥密度やケイ砂混合率、層間陽イオンの種類などをパラメータとしているが、例えば乾燥密度 1.6Mg/m³ のケイ砂混合クニゲル V1 の場合、蒸留水で $d=0.032\sqrt{T}$ 、幌延地下水で $d=0.008\sqrt{T}$ という結果を得ている。この研究では、浸入距離が時間の平方根に比例するとして整理をしている。

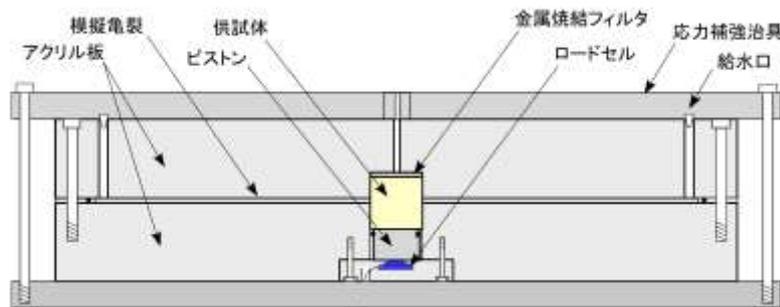


図 4.1.4-4 既往の研究で用いた浸入試験装置

(2) 試験結果

1) 平面ケース（イオン交換水）

図 4.1.4-5 に通水圧と通水量の関係を示す。100mL/min の流量制御で試験を実施したため、通水量は一定勾配で増加している。また、通水圧は、概ね 5kPa 以下に収まっていることが分かる。これは、亀裂幅が 1mm とはいえ、全周方向に排水できるために、通水圧があまり上昇しなかったことと、後述する亀裂内のパイピングによる水みちの形成によるものと考えられる。

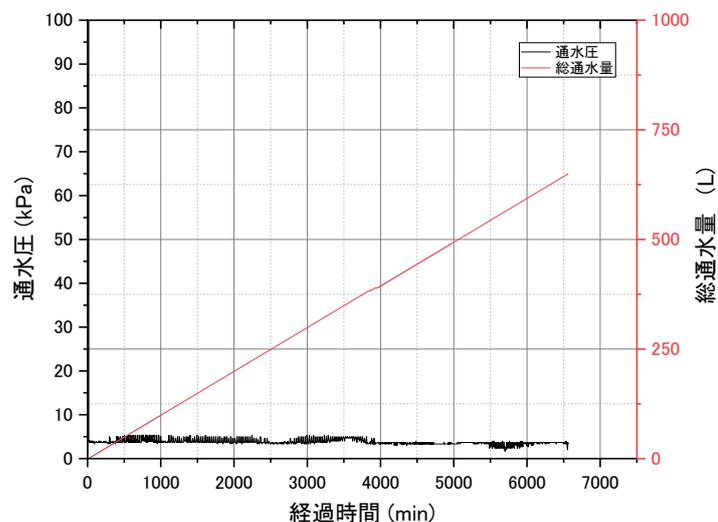


図 4.1.4-5 通水圧と総通水量の関係

図 4.1.4-6 には、模擬亀裂内のエロージョン状況の観察結果を示す。通水開始から 3 時間程度で筋状の流出状況が観察され、供試体近傍には円周状に堆積物も見られる。5 時間後位からエロージョン物質の堆積と緩衝材の隙間への侵入 (infiltration) 現象が同時に発生し、1 日経過後には隙間内の緩衝材にパイピング現象がみられる。それ以降、パイピング・エロージョンと浸入現象が同時に発生し、隙間内の緩衝材が拡大を続けた。

図 4.1.4-7 には、亀裂の中の流出物質の堆積状況と緩衝材の侵入状況を評価するパラメータとして導入した堆積距離 D と浸潤距離 d の定義を示す。堆積距離 D と浸潤距離 d は、中心の孔の径 ϕ (5 cm) として、それぞれ、 $D=0.5*(L-\phi)$ 、 $d=0.5*(l-\phi)$ で表される。このように定義された堆積距離と浸入距離の経時変化を図 4.1.4-8 に示す。図に示すように、堆積距離と浸入距離はどちらも経過時間の 3 乗に比例する結果となった。前述の既往の研究では、平方根に比例する結果であったが、本検討では、100mL/min で通水している場での流出挙動、浸入挙動を観察しており、この流速の影響により差異が生じたと考えられる。

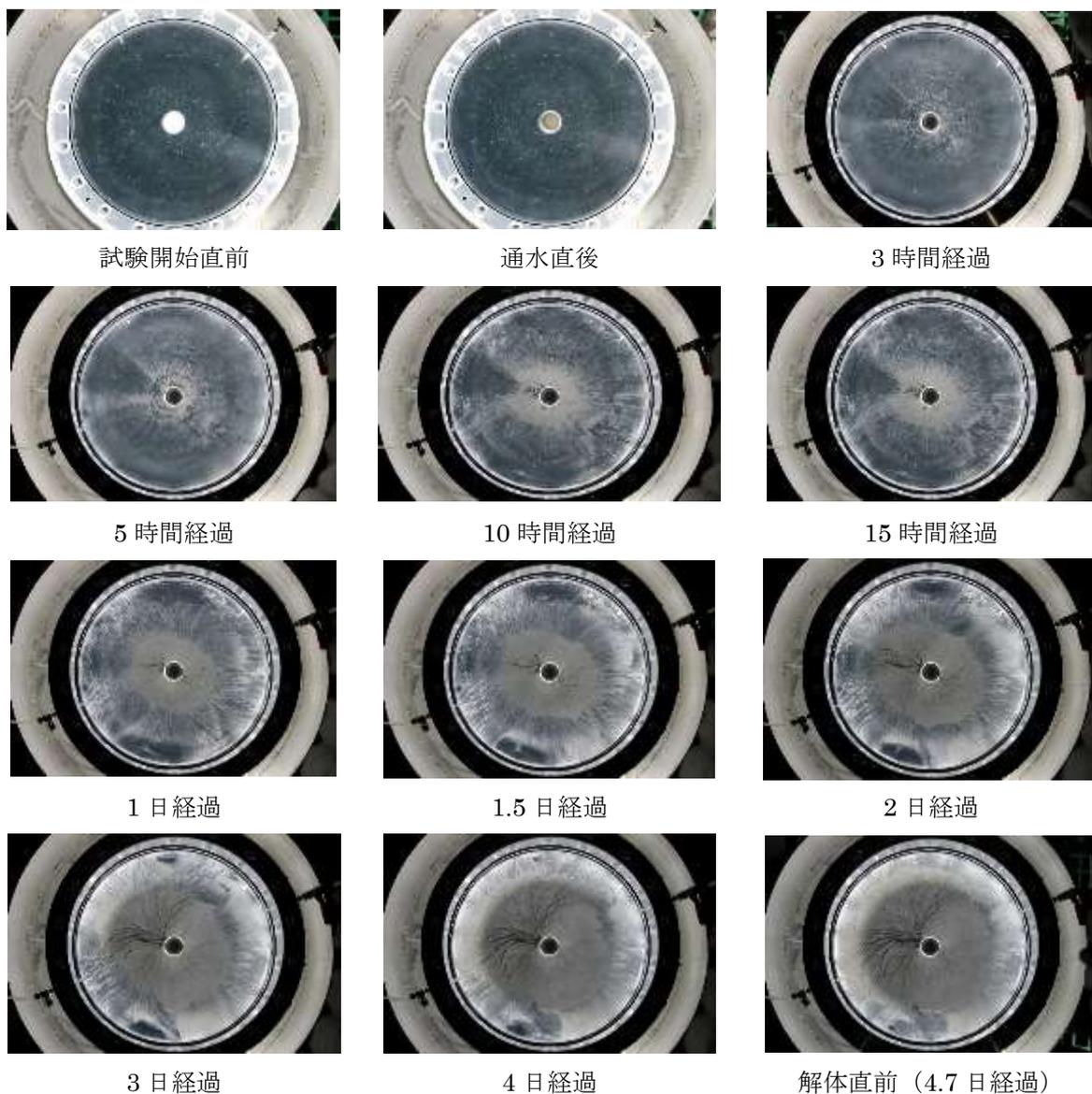


図 4.1.4-6 模擬亀裂内のエロージョン状況観察結果 (平面ケース)

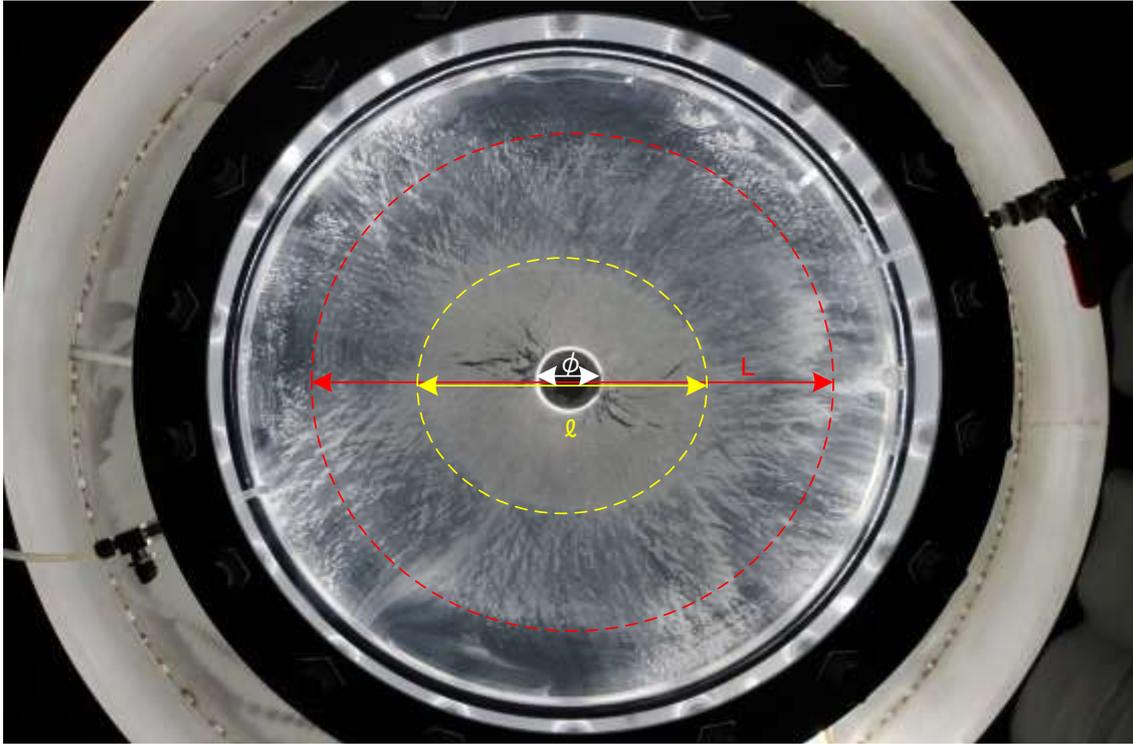


図 4.1.4-7 堆積距離と浸入距離の定義

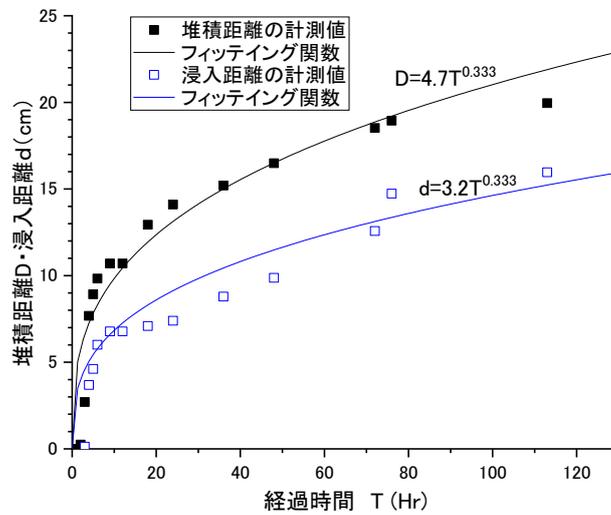


図 4.1.4-8 堆積距離と浸入距離の経時変化

図 4.1.4-9 には、堆積距離と浸入距離における流速の経時変化を示す。概ね、通水開始から 80 時間を超えると流速が 4.0cm/min 程度の箇所に収斂していることが分かる。すなわち、亀裂内の流速が 4cm/min を少し上回る程度であれば、膨潤により亀裂内にベントナイトが浸入でき、4cm/min 以下であれば、ベントナイトが流出しても沈殿が発生すると考えられる。

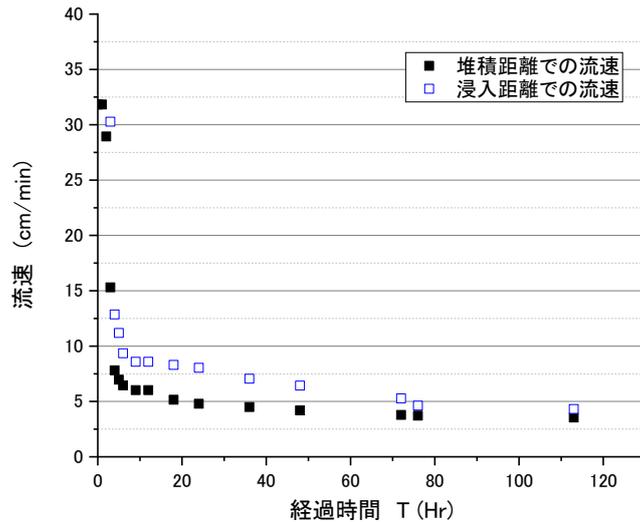


図 4.1.4-9 堆積距離と浸入距離における流速の経時変化

図 4.1.4-10 には、解体時の供試体の写真を示す。なお、写真に示す供試体は下側が供試体上部となっている。写真から、亀裂を設置した供試体中央の上下が凹んでいることが分かる。また、この凹み箇所では写真の供試体の傍らに置いてあるケイ砂の沈殿が観察された。このことから、亀裂面の上下で砂が対流し供試体を削った結果、写真のような供試体形状となったものと考えられる。また、流出は、供試体の全周に渡って見られるが、砂の対流によって削られたのは片方向のみであった。これは、供試体設置や蓋の設置などの際に、供試体が中心からずれてしまい、隙間が僅かに大きい方が削られたものと考えられる。模擬亀裂の亚克力板を剥がすときに、供試体上端面が亚克力に貼りついて、上側の凹部で切れてしまったが、その断面では供試体の内部がまだ密実であることを示している。また、模擬亀裂内にあるベントナイトには流出したケイ砂も見られるが、その量はわずかなようである。



図 4.1.4-10 解体時の供試体写真（供試体は下側が上部）

2) 直線ケース（イオン交換水）

図 4.1.4-8 図 4.1.4-9 に示すように、平面状の模擬亀裂では、流出したベントナイトの沈殿や浸入現象が起こる範囲が流速の大小で規定できる可能性があることが分かった。そこで、本ケースでは、図 4.1.4-2 の直線ケースに示すように、湧水が亀裂内を流れても流速が変化しないように

模擬亀裂に 1mm 厚のゴム膜を挟み込んで、平面ケースと同じく、100mL/min のイオン交換水を通水した場合の流出現象の観察を行った。

図 4.1.4-11 に通水圧と通水量の関係を示す。100mL/min の流量制御で試験を実施したため、通水量は一定勾配で増加している。一方、通水圧は、前述の平面ケースでは 5kPa 以下であったのに対して、このケースでは 100kPa 程度であることが分かる。これは、流路の面積がゴムシートによって約 1/4 に制限されたことに起因するものと考えられる。

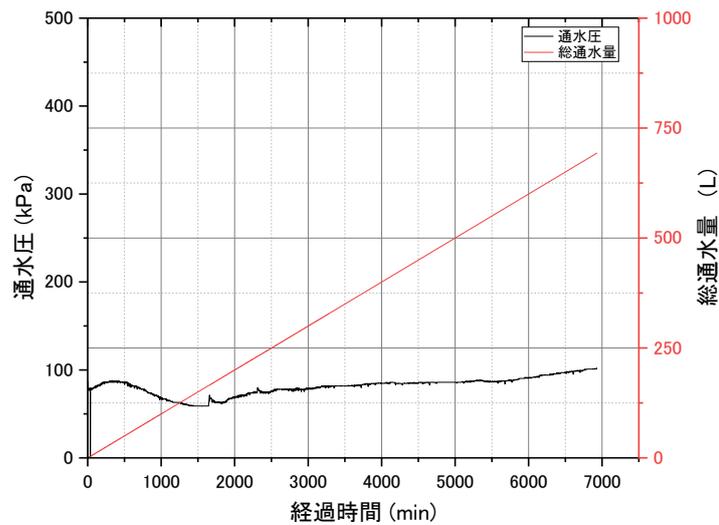


図 4.1.4-11 通水圧と総通水量の関係

図 4.1.4-12 には、模擬亀裂内のエロージョン状況の観察結果を示す。通水開始から 0.5 時間程度で筋状の流出状況が観察された。この筋状の流出物は、試験中、終始、観察された。試験開始から 3 時間程度で供試体から発生した気泡が流路に止まり、その近傍に流出物が堆積する現象が観察された。この堆積物は、試験終了までゆっくりと成長したが、流出を妨げるような傾向は観察されなかった。そのため、図 4.1.4-7 に示したような、亀裂の中の流出物質の堆積状況や緩衝材の侵入状況を評価することができなかった。ただし、直線ケースの場合には堆積物がみられなかったことから、湧水が亀裂内を流れても流速が変化しない場合には、堆積や浸入現象よりも流出現象が卓越することが分かった。

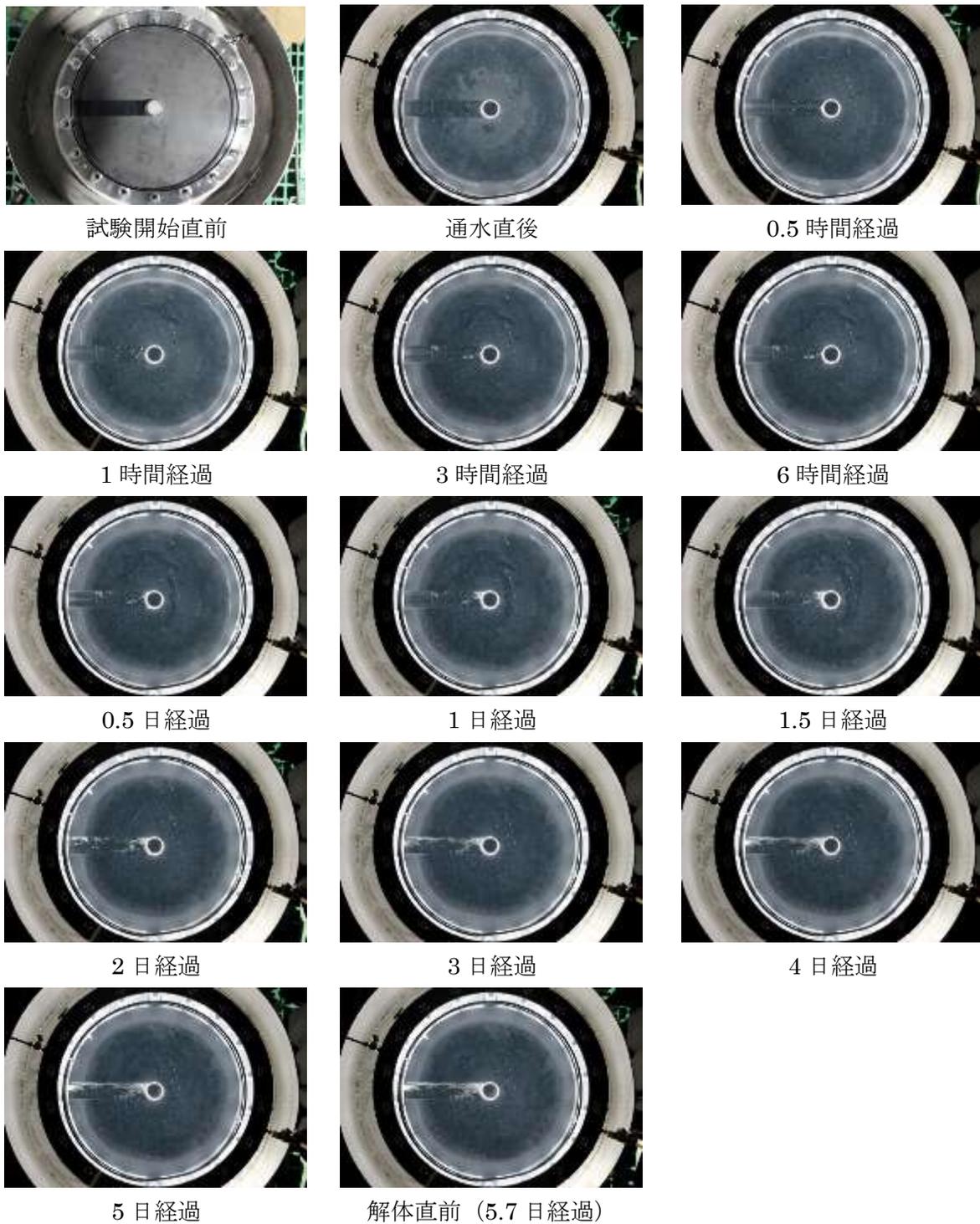


図 4.1.4-12 模擬亀裂内のエロージョン状況観察結果（直線ケース）

図 4.1.4-13 には、解体時の供試体の写真を示す。なお、写真に示す供試体は下側が供試体上部となっている。写真から、亀裂を設置した供試体中央の下側のみが凹んでおり、上側は健全な状態であることが分かる。また、この凹み箇所では写真の供試体の傍らに置いてあるケイ砂の沈殿が観察された。このことから、亀裂面の上下で砂が対流し供試体を削った結果、写真のような供試体形状となったものと考えられる。また、流出は、片方向のみであったが供試体の全周に渡って流出がみられた。



図 4.1.4-13 解体時の供試体写真（供試体は下側が上部）

3) 平面ケース（NaCl 水溶液）

図 4.1.4-14 に通水圧と通水量の関係を示す。100mL/min の流量制御で試験を実施したため、通水量は一定勾配で増加している。一方、通水圧は、最大で 400kPa 程度であった。同じ平面ケースでイオン交換水を使用した場合には、通水圧が 5kPa 以下であったことから、使用した液種の違いで亀裂内の流出物の性状が変化したものと考えられる。

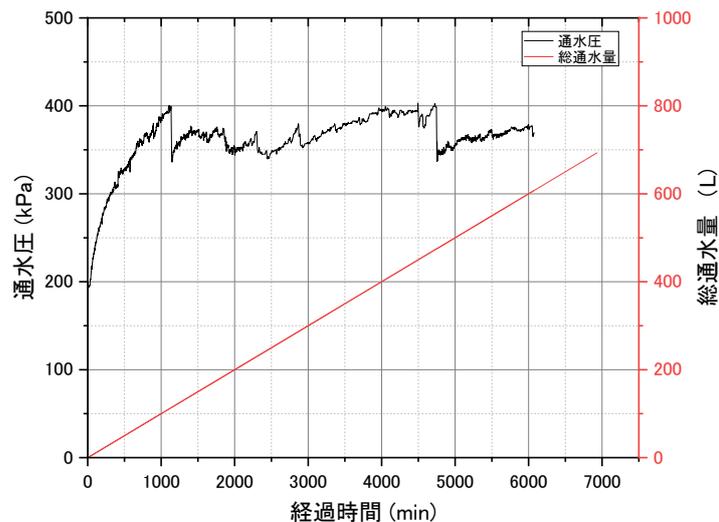
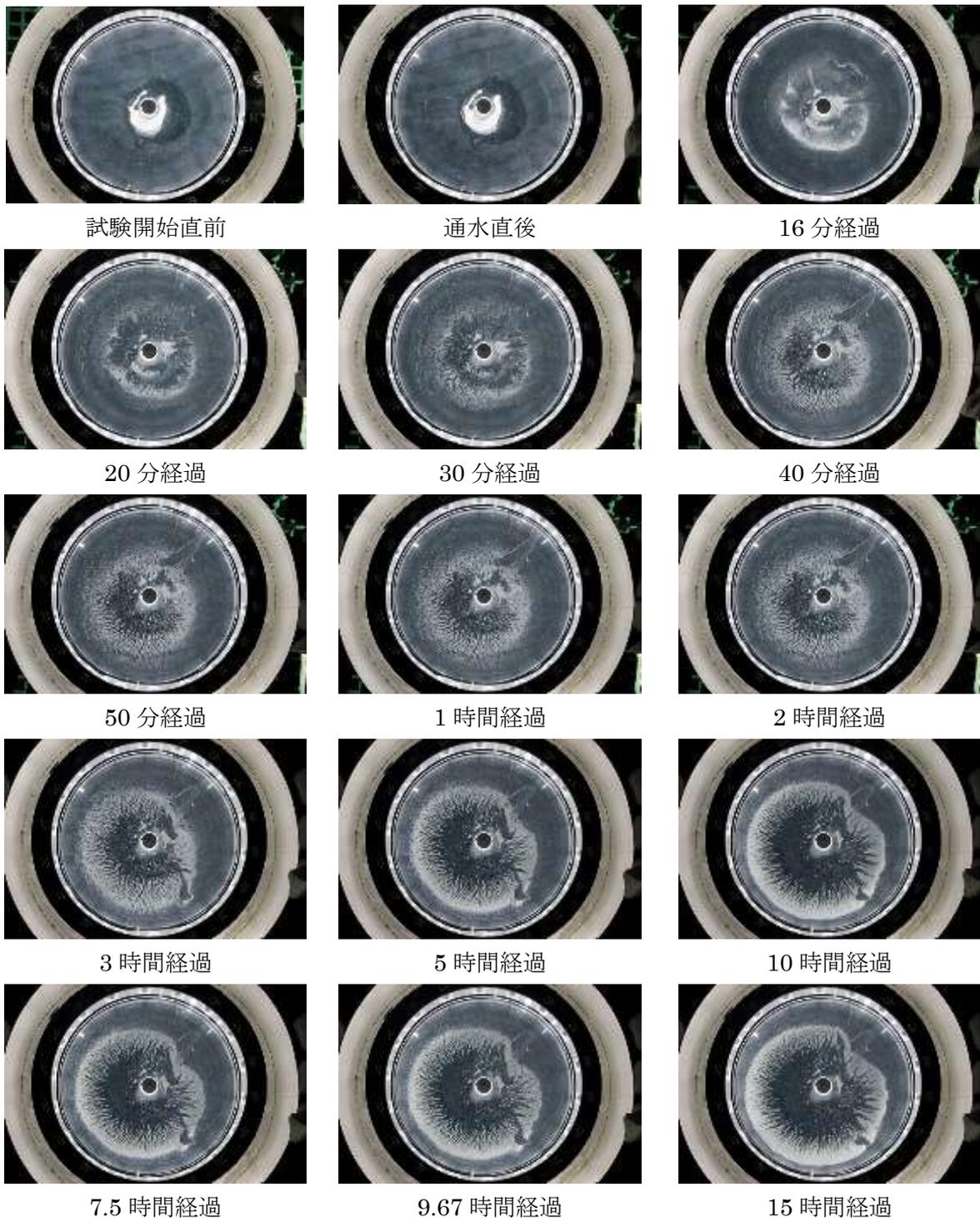


図 4.1.4-14 通水圧と通水量の関係

図 4.1.4-15 には、模擬亀裂内のエロージョン状況の観察結果を示す。写真から、同じ平面ケースでイオン交換水を用いた場合に観察された浸入現象が試験終了まで観察されなかった。また、流出物はリング状に堆積し、堆積物のリングには無数の水みちが形成された。なお、堆積物のリングの右側が歪なのは、亀裂内に気泡が存在したためである。

図 4.1.4-16 には、亀裂の中の流出物質の堆積状況を評価するパラメータとして導入した堆積物リングの内側までの距離 D_i と堆積物リングの外側までの距離 D_e の定義を示す。堆積距離 D_i と D_e は、中心の孔の径 ϕ (5 cm) として、それぞれ、 $D_i=0.5*(L_i-\phi)$ 、 $D_e=0.5*(L_e-\phi)$ で表される。このように定義された堆積距離の経時変化を図 4.1.4-17 に示す。図に示すように、堆積距離はど

ちらも経過時間の0.1乗に比例する結果となった。NaCl水溶液の場合、流出物が凝集していることが予想され、その堆積物もイオン交換水の場合に比べてある程度の強度を有しているものと考えられる。そのため、堆積物が発生すると堆積物がフィルターの役割を担い、堆積物の成長に拍車を掛け、一気に堆積物のリングが形成される。また、そのリングが一定の大きさになると、その成長は鈍化する傾向にある。このため、イオン交換水の場合と異なり、堆積距離はどちらも経過時間の0.1乗に比例する結果となったものと考えられる。



(次ページに続く)

(前ページの続き)

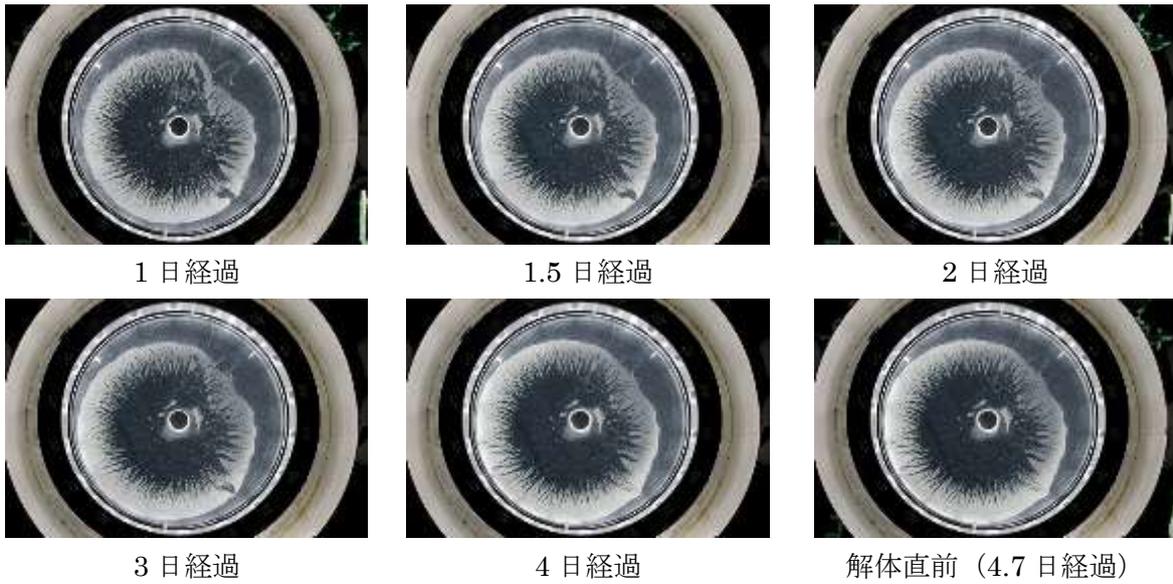


図 4.1.4-15 模擬亀裂内のエロージョン状況観察結果 (平面ケース)

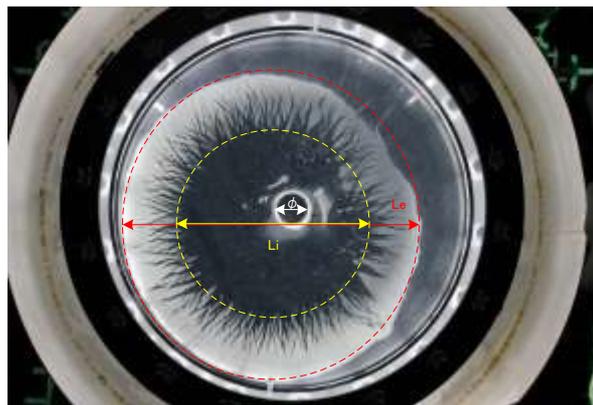


図 4.1.4-16 堆積距離の定義

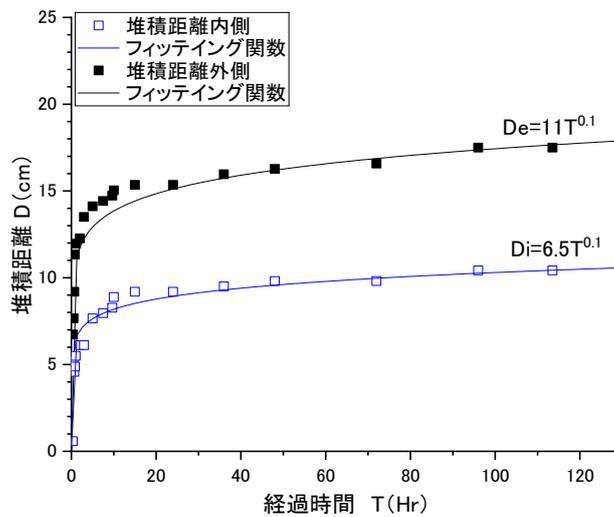


図 4.1.4-17 堆積距離の経時変化

図 4.1.4-18 には、解体時の供試体の写真を示す。写真では、亀裂を設置した供試体中央よりも

上側が小さく、下側が大きく見えるが、これは、亀裂よりも上側の供試体は膨潤せずに初期状態のままで、亀裂よりも下側の供試体は膨潤して直径が大きくなったためである。解体時には、供試体はセルの孔の直径まで膨潤しており、砂の沈殿も見られなかった。流出物の中にも砂分はほとんど観察されなかった。ただし、供試体の一部に水みちの形跡が観察できた。試験を継続すれば水みち内にケイ砂の堆積物が観察されたものと考えられる。



図 4.1.4-18 解体時の供試体写真

4.1.5 総通水量とエロージョン量の関係

図 4.1.5-1 には、総通水量とエロージョン質量の関係を示す。図には、同規模のエロージョン試験結果として工学規模エロージョン試験と高水圧・定流量試験の総通水量とエロージョン質量も併せて示す。

図から、全てのケースで総通水量とエロージョン質量の関係の勾配は、既往の他の試験と概ね一致していることが分かる。イオン交換水を用いたケースと NaCl 水溶液を用いたケースで総通水量とエロージョン質量の関係に有意な差がみられた。イオン交換水を用いたケースは平面ケースと直線ケースで概ね一致しており、同じ材料のクニゲル V1 ペレットで得られた総通水量とエロージョン質量の関係と一致している。一方、NaCl 水溶液のケースは、他のケースに比べ下限値を示している。また、NaCl 水溶液のケースの総通水量とエロージョン質量の関係の勾配が小さくなる傾向を示しており、NaCl 水溶液を用いたエロージョン試験のケースと同じ傾向である。

この図が示唆することは、亀裂へのエロージョンに対しては、本試験条件である 1 mm 程度の比較的大きな亀裂であっても、イオン強度が高い地下水ではエロージョンが抑制されるということである。理由としては、亀裂に対して凝集したエロージョン物質が目詰まりして流れないことと、亀裂内では全方位に流れて流路面積が大きいために流速が大きくなることなどが挙げられる。今後、更なる検討を加えて、エロージョン抑制効果の有無、メカニズムなどを解明することは、エロージョンの対策を考える上で有用である。

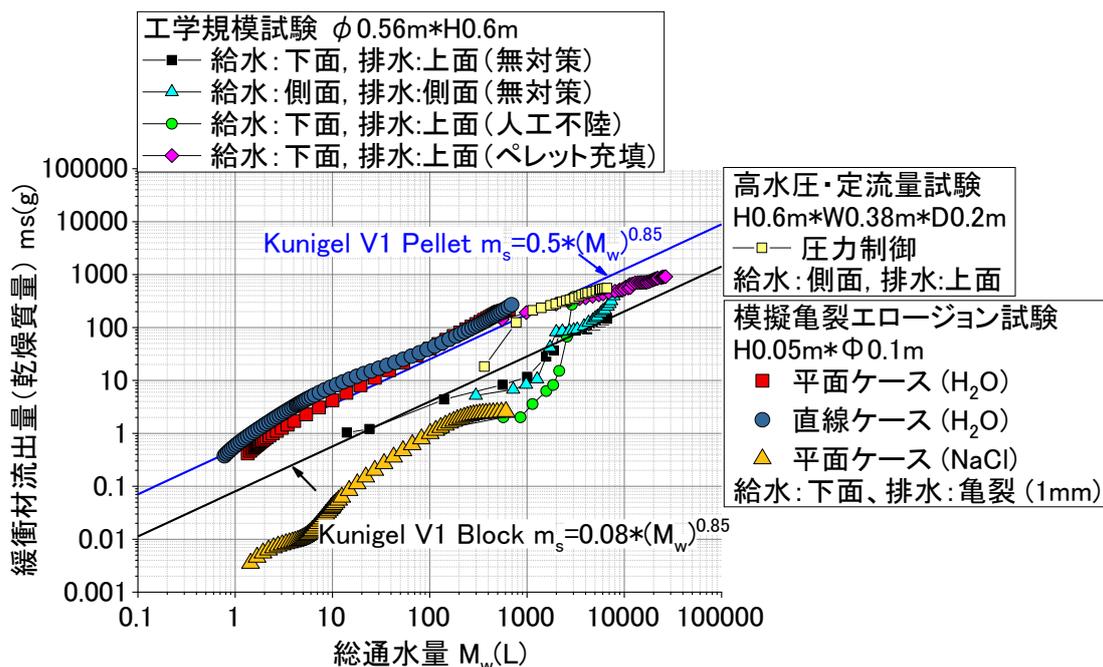


図 4.1.5-1 総通水量とエロージョン質量の関係

4.1.6 まとめ

本検討では、緩衝材のパイピングやエロージョンに関する現象およびその工学的対策に関する知見を得ることを目的として、室内試験による検討を行った。以下にそのまとめを示す。

①流出現象に対するケイ砂の影響

緩衝材の流出現象に対するケイ砂（緩衝材含有のもの）の影響を確認するため、ケイ砂含有率の異なる緩衝材ブロックを用いた流出試験を行った。その結果、ケイ砂含有率が高いほど有効ペントナイト乾燥密度が低いために膨潤性能が小さく、水みちの断面積が大きくなる傾向等、パイピングの形成に違いが確認されたものの、総通水量とエロージョン質量の関係はすべてのケイ砂含有率で有意な差はなく、ケイ砂含有率が緩衝材の流出現象に与える影響は小さいことがわかった。

②高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験

実際の処分場で想定される高水圧・低流量下における緩衝材の流出現象を評価するために、実処分場環境下を模擬した条件下での流出試験を行った。その結果、緩衝材の膨潤により、通水量が減少する傾向（90mL/min から 50mL/min（20日程度））が確認された。また、高水圧・低流量下における条件下においても流出現象は確認され、その総通水量とエロージョン質量の関係は、通水量が時間経過に伴って減少していることから、勾配が緩くなったものの、工学的対策を施した工学規模エロージョン試験の結果[4]～[7]と概ね同じ傾向でデータが推移した。

③亀裂を有する模擬岩盤の流出試験

孔壁近傍の亀裂（EDZ 等）からの流出挙動を把握する目的で、亀裂を有する岩盤での処分孔を模擬した（1mm の隙間）流出試験を行った。その結果、1mm の隙間からもこれまでの試験と同様の流出現象が確認された。また、通水液として用いた液種（イオン交換水、NaCl 水溶液）の影響が大きく、NaCl 水溶液を用いた場合の総通水量とエロージョン量の関係は他のケースと比べて下限値を示すことが確認された。

今年度は、隙間に堆積するケイ砂の影響、高水圧・低流量環境下、亀裂の影響とこれまでの室内試験よりも実処分場環境を想定した室内試験を行い、流出現象が起こる可能性が高いことを確認した。今後は、4.2 に後述した地下研究施設における緩衝材流出試験の結果も考慮し、より実処分場環境下に近い条件下での流出試験を行う予定である。

4.2 地下研究施設における緩衝材流出試験

4.2.1 目的と概要

(1) 目的

高レベル放射性廃棄物地層処分施設において、緩衝材の定置後再冠水期間に、処分孔への地下水の浸入による水みち形成（以降、パイピングと呼ぶ）、破過、浸食（以降、エロージョンと呼ぶ）が発生し、ベントナイトの自己修復作用を妨げる場合には、長期性能に影響を与える可能性がある。本業務は、実際の岩盤中で緩衝材のパイピング、破過、エロージョンが発生する状況を確認し、緩衝材の設計に際して考慮すべき要素となるエロージョンに関する知見を得ることを目的としている。

平成 27 年度は、複雑な地下水流れとなる割れ目帯を回避するための試験孔の延伸、緩衝材へ作用した地下水の迂回先となる水みちを閉塞するための試験孔へのモルタル打設、そして孔内湧水を制御するためのボーリング孔の掘削を実施し、エロージョンの計測を行うための試験環境の改善を行った。そのうえで、湧水の状態を制御することによって、緩衝材のパイピングには緩衝材にかかる水圧が影響することと、水みちが拡張され水圧が低下する過程で緩衝材のエロージョンが生じることが確認された。

平成 28 年度では、昨年度から継続して設置していた試験体の回収に加え、緩衝材のパイピングと膨潤圧との関係を実際の岩盤で確認するとともに、パイピング、エロージョンの対策工として想定される蓋やベントナイトペレットを実際に設置し、その効果を確認することを目的として、新たに 3 ケースの原位置試験を実施した。3 ケースの注水試験では（以降、緩衝材流出試験と呼ぶ）、蓋を設置したことにより、緩衝材の上下方向への膨潤変形抑制によるエロージョンの抑制効果が確認されたこと、原位置における緩衝材の施工技術の向上、現象の再現性の確認などの成果が得られた。緩衝材の上部、下部に設置した土圧計の挙動に着目すると、約 1 ヶ月（約 700 時間）の試験期間では、土圧（緩衝材の膨潤圧）は大きな変化を示さなかった。しかしながら、各ケース共に注水開始から 350 時間経過した頃から、上下の土圧（緩衝材の膨潤圧）にも、上昇する傾

向がみられた。すなわち、この時期から緩衝材の土圧計設置箇所付近まで浸潤が進行したと推定され、緩衝材の上下の膨潤圧を発現させるには、さらなる時間を要することが確認された。また、蓋を設置した状態において、緩衝材そのものや隙間部分に充填したペレットが膨潤することで、緩衝材と試験孔壁間の隙間が止水されることにより、注水した水が試験孔周辺岩盤へ流れる可能性があることが示唆された。

平成 29 年度（本年度）は、昨年度の結果および知見を踏まえ、緩衝材が十分に膨潤した条件下において、緩衝材のエロージョンの発生の有無、およびその挙動の確認し、注水した水の浸潤経路（緩衝材内部なのか、試験孔周辺岩盤内なのか）の確認等を目的として、水理試験、緩衝材流出試験、等を実施した。なお、水理試験は、試験体の試験孔への定置前と試験体の回収直後に実施し、緩衝材の膨潤変形、パイピング、エロージョンによる試験孔周辺岩盤の水理特性の影響を定量的に把握することにより、昨年度に示唆された注水した水が試験孔周辺岩盤へ流れる可能性の検証の一つとした。

(2) 緩衝材流出試験概要

今年度の業務の流れを図 4.2.1-1 に示す。また、試験場所である試験坑道 5 における各試験孔の位置関係、寸法、等を図 4.2.1-2 に示した。

事前準備作業として、試験坑道 5 内では試験孔の整備、試験装置の整備、試験エリアの整備、試験孔の湧水量測定を実施し、地上では緩衝材ブロックの製作、試験装置の整備、水理試験方法の検討・準備を行った。原位置（試験坑道 5）では、試験孔 3 における水理試験、試験体の組立・設置・緩衝材の膨潤圧測定を実施した。また、膨潤圧の測定・確認後、試験孔 3 における緩衝材流出試験を実施し、その後、試験体を回収した。緩衝材流出試験および試験体の回収後、再び試験孔 3 において水理試験を行った。地上作業としては、試験中に採取した水のベントナイト濃度分析、試験体回収後に採取したコアサンプルの密度・含水比を測定した。

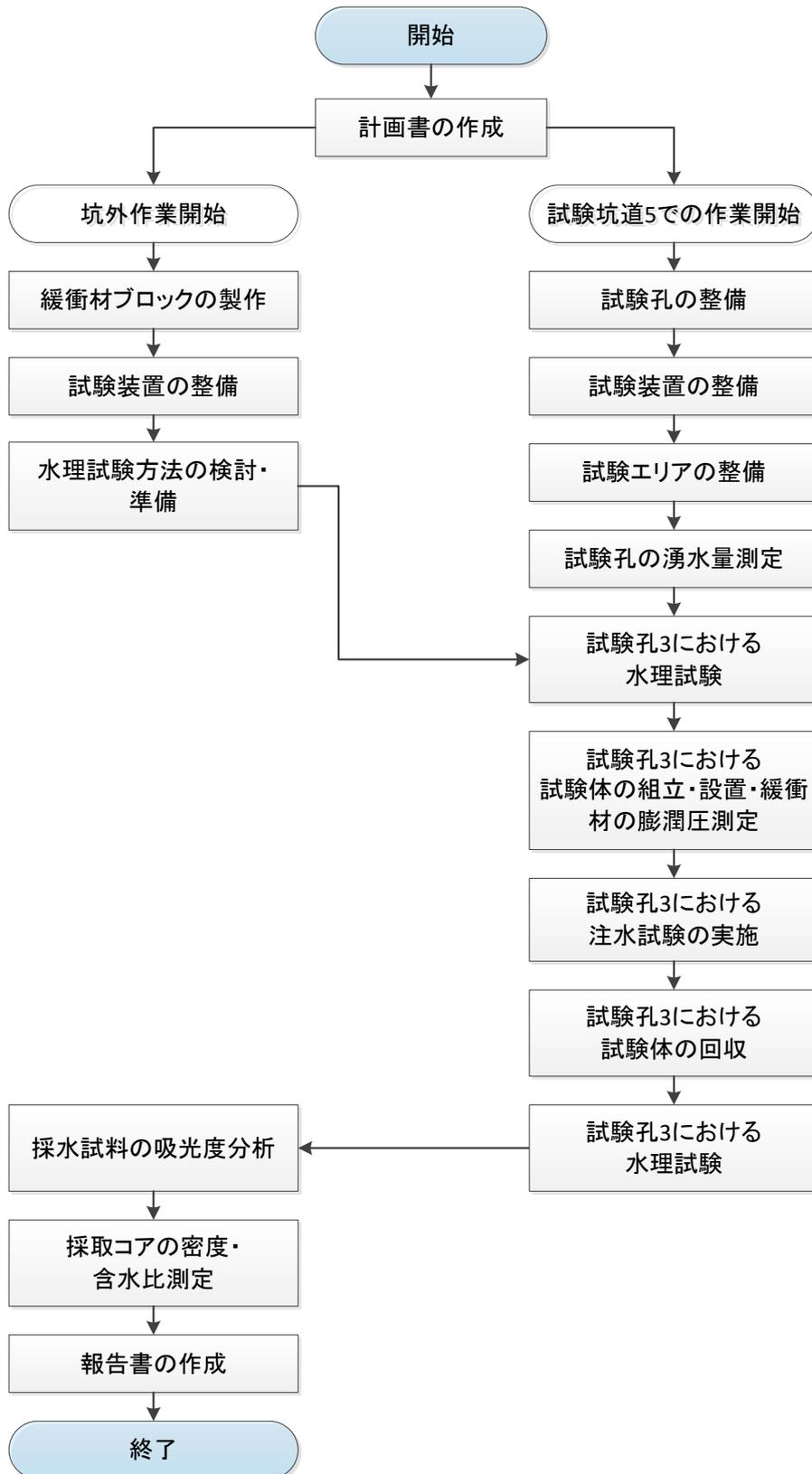


図 4.2.1-1 本業務の流れ

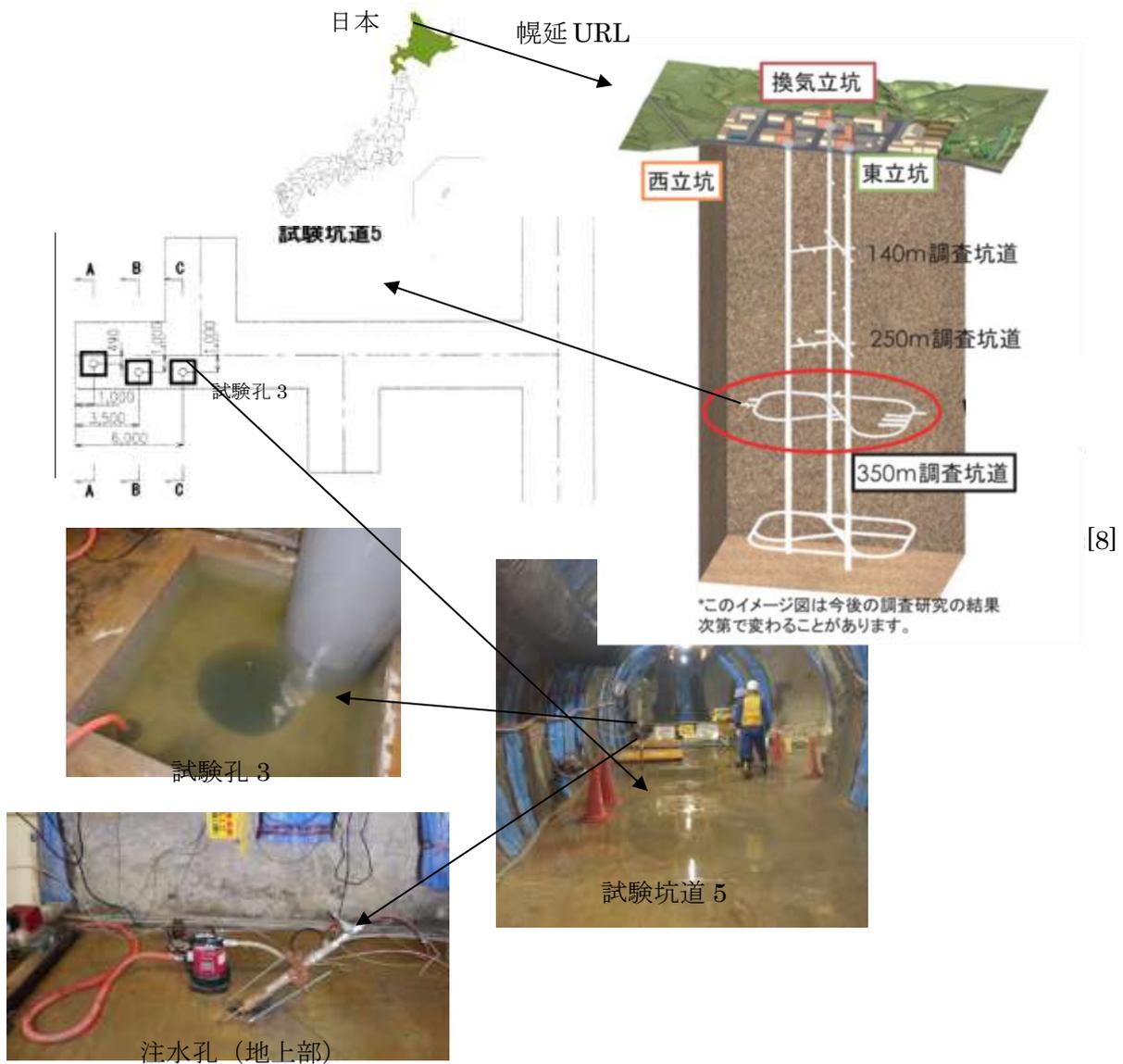


図 4.2.1-2 試験坑道 5

4.2.2 湧水量測定

(1) 測定概要

試験孔 2 および 3 の湧水量測定を実施した。測定方法は過年度と同様に投げ込み式の水位計(図 4.2.2-1 および表 4.2.2-1 参照)による静水圧の連続測定とした。

湧水量は、測定対象孔を排水した状態で水位計を孔底に投入し、湧水による水位回復過程で上昇する静水圧から水位上昇速度を求め、これに試験孔の断面積を乗じて算出した。



図 4.2.2-1 水位計 (S&DL mini およびバロメータ)

表 4.2.2-1 水位計の仕様

種別	名称	主な仕様	数量	備考	寸法
水位計	圧力式水位計 (絶対圧水位計)	OYO 製 : S&DL mini4800 水位測定範囲 : 10m 精度 : $\pm 0.1\%$ of F.S. メモリ容量 : 40000 点	1	温度測定も可能	22mm×L150mm
	大気圧計 (大気圧補正用)	OYO 製 : S&DL mini4800 精度 : $\pm 0.1\%$ of F.S. メモリ容量 : 40000 点	1	上記水位計の大気圧補正用	22mm×L150mm

(2) 湧水量測定の測定ケース

湧水量測定は、試験孔 3 を測定対象としたケース 1 および 3 と、試験孔 2 を測定対象としたケース 2 の計 3 ケースを実施した。設定したケースを表 4.2.2-2 に示す。試験孔 3 を対象とした測定では、測定しない試験孔 2 の状態を、ケース 1 では水位を孔底から約 80cm に制御(緩衝材流出試験時の水位と同等)し、ケース 3 では満水状態(孔底から約 210cm)とした。試験孔 2 を対象としたケース 2 の測定では、測定しない試験孔 3 は、試験時の水位を孔底から約 80cm に制御した状態とした。なお、試験孔 1 については腐食試験を実施していたため水位は変更しなかった。

なお、試験孔 3 の近傍に設置されている注水孔は、いずれのケースもパッカーを拡張し閉塞した状態とした。

表 4.2.2-2 湧水量測定の場合設定一覧

ケース No.	各孔の状態		
	試験孔 1	試験孔 2	試験孔 3
ケース 1	腐食試験実施	水位制御 (孔底から約 80cm)	測定
ケース 2	腐食試験実施	測定	水位制御 (孔底から約 80cm)
ケース 3	腐食試験実施	満水 (孔底から約 210cm)	測定

(3) 湧水量測定結果

湧水量測定の結果として、表 4.2.2-3 に各ケースの平均湧水量を示す。なお、平均湧水量は、試験孔の高さを、試験孔からの排水終了直後から試験孔が満水となる高さまで水位が上昇するのに要した時間で除して得られた平均水位上昇速度に、試験孔の平均断面積を乗じて求めた。また、ケース 1、3 (試験孔 3 を対象とした試験) およびケース 2 (試験孔 2 を対象とした試験) の水位の経時変化を図 4.2.2-2 および図 4.2.2-3 に、図 4.2.2-4 および図 4.2.2-5 には移動平均 (水位データの平滑化) を適用して得た湧水量と孔内水位の関係をそれぞれ示す。なお各図には、参考までに平成 28 年度に測定した結果を併せてプロットした。

図 4.2.2-2 に示す試験孔 3 の水位の経時変化では、今年度実施した H29 ケース 1 および H29 ケース 3 は、平成 28 年度実施に実施した H28 ケース 1 よりも水位の回復が早く、図 4.2.2-3 に示す試験孔 2 の水位の経時変化では、逆に今年度実施した H29 ケース 2 の方が、昨年度実施した H28 ケース 3 の水位の回復よりも遅かったことがわかる。湧水量測定では、短期間に試験孔の水位を上下させるため、試験系を含む水理場の乱れ (周辺岩盤の水圧の乱れ) の影響を受けやすいことが考えられる。そのため、昨年度の試験とは異なる結果となったと判断した。

一方、図 4.2.2-4 および図 4.2.2-5 の水位と湧水量との関係を示すグラフでは、いずれも水位が低いほど湧水量が多く、水位が上昇するにつれて湧水量が少ない従来と同じ傾向がみられた。また、緩衝材流出試験を実施する予定の試験孔 3 においては、表 4.2.2-3 より、試験孔 2 の水位状況に依らず、ほぼ同程度の湧水量であることが確認できた。

表 4.2.2-3 各ケースの平均湧水量

ケース	測定箇所	湧水量	試験孔 1※	試験孔 2	試験孔 3
1	試験孔 3	0.63 L/min	満水 (孔底から 175cm)	水位制御 (孔底から 80cm)	計測
2	試験孔 2	0.37 L/min	満水 (孔底から 175cm)	計測	水位制御 (孔底から 80cm)
3	試験孔 3	0.66 L/min	満水 (孔底から 175cm)	満水 (孔底から 210cm)	計測

(※オーバーパック腐食試験を実施中のため水位は変更しなかった)

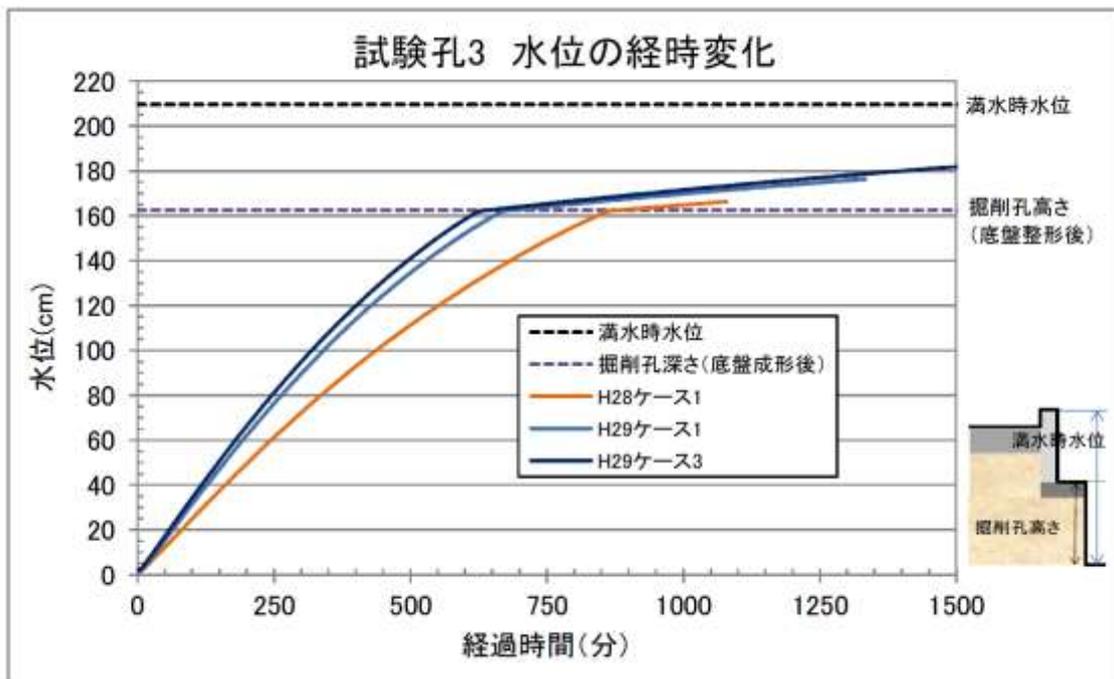


図 4.2.2-2 試験孔 3 の水位の経時変化 (ケース 1, 3)

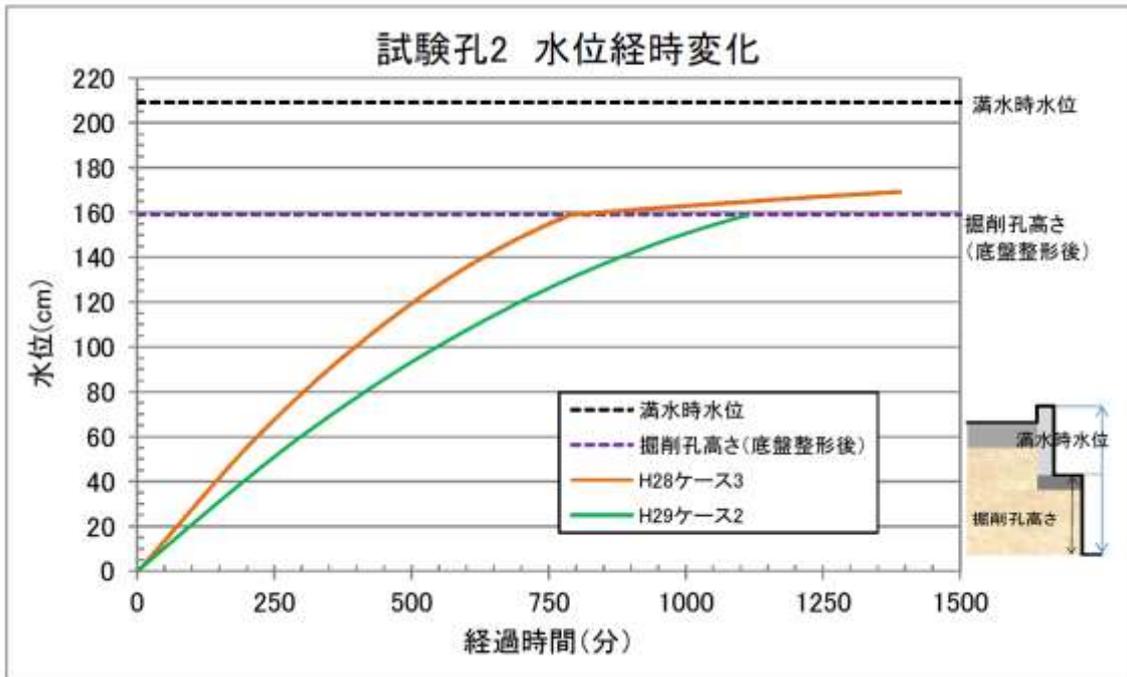


図 4.2.2-3 試験孔 2 の水位の経時変化 (ケース 2)

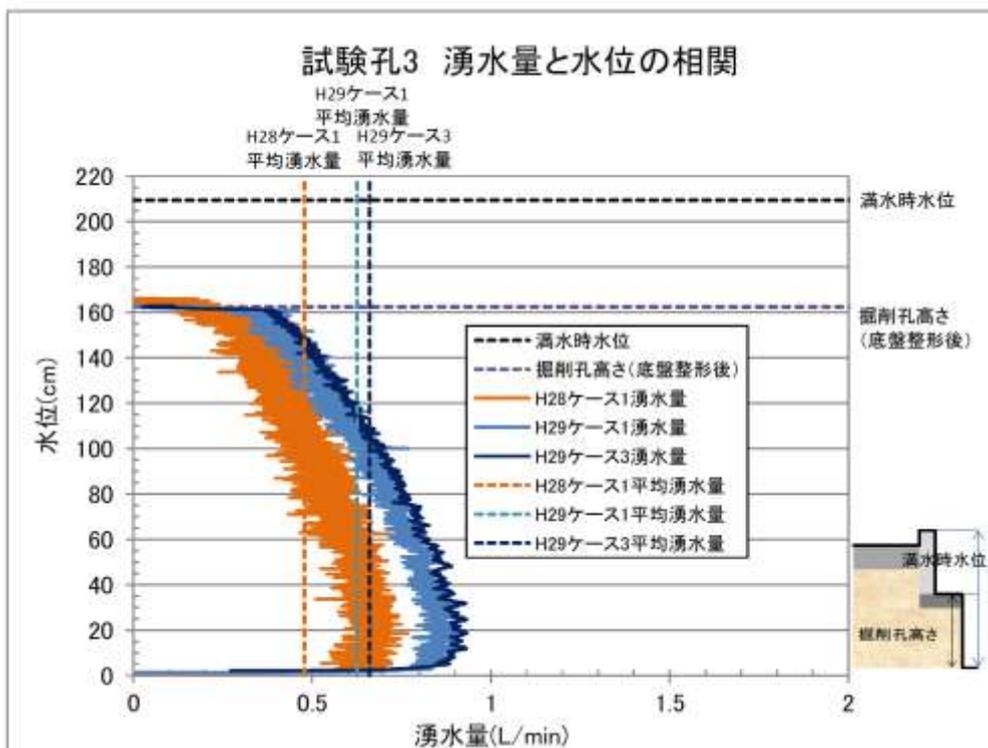


図 4.2.2-4 試験孔 3 の湧水量と水位の相関 (移動平均)

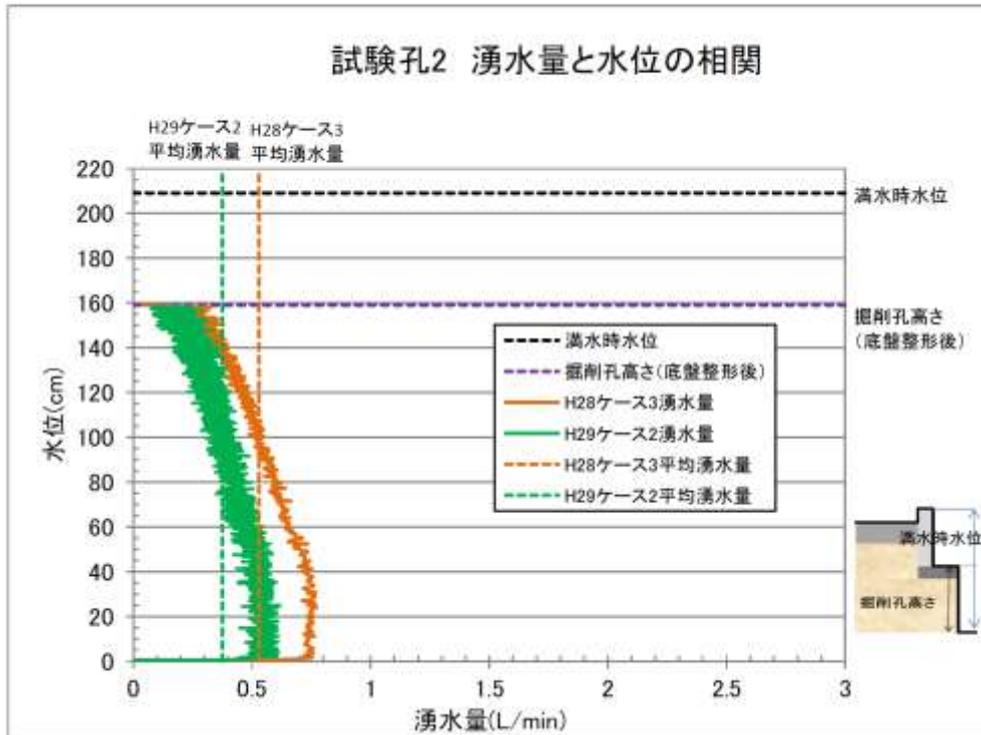


図 4.2.2-5 試験孔 2 の湧水量と水位の相関 (移動平均)

4.2.3 試験孔 3 を対象とした水理試験

(1) 水理試験の概要

試験孔 3 の孔径である約φ580mm に適用できる止水プラグを用いて、水理試験を行った。止水プラグの設置状況を図 4.2.3-1 に示す。また、注水孔は、パッカーをできるだけ注水孔の孔底（試験孔と交わる地点）まで押し込んだ位置に設置後、拡張して遮水した。

水理試験区間は図 4.2.3-2 に示すとおり、孔底から、約 20cm 毎の 4 区間とし、4 区間目は定置治具上蓋までの区間を含んだ区間とした。ただし、最下段のケース 1 の試験区間は、定置治具の底盤の厚みが 3cm あることを考慮して孔底から 23cm とし、ケース 2 からケース 4 の区間は、約 20cm 毎に深度を上方にずらして水理試験を行った。なお、上部区間（ケース 3, 4）は、止水プラグの頭部が孔外に出るため、鋼製のカバーを孔口部に設置し、止水プラグ上部を鋼製のカバー内に収めた状態で拡張し、水理試験を実施した。

今回実施した水理試験は、流量を段階的に上昇させ、その都度、定流量で一定期間注水を継続する方法を採用した（定流量試験と呼ぶ）。なお、試験区間の圧力（水頭：水位変動量）の測定は、止水プラグ下部に設置した圧力計を利用した。



図 4.2.3-1 水理試験状況（止水プラグ設置状況）

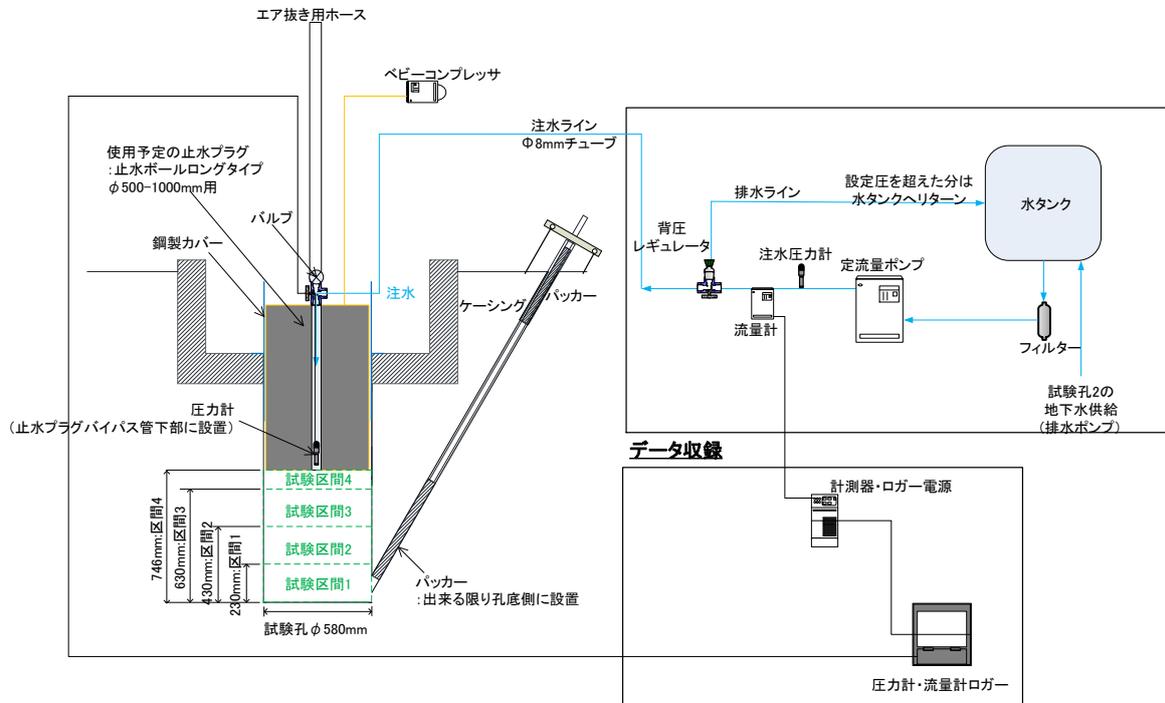


図 4.2.3-2 水理試験区間および試験装置

(2) 水理試験方法

1) 水理試験装置

止水プラグの仕様を表 4.2.3-1 に示す。なお、水理試験装置の概要図は前掲の図 4.2.3-2 に示してある。

表 4.2.3-1 水理試験に使用したプラグ 仕様

名称	製造	呼び径 [mm]	寸法[mm]		重量 [kg]	最大 使用圧 [MPa]	最大 許容背圧 [MPa]	バイパ ス径 [インチ]
			径	長さ				
止水ボール ロングタイプ バイパス付	(株) ホーシ ン	500/1000	472	1185	31.3	0.15	0.10	2

2) 定流量試験手順の概要

今回実施した水理試験は、通常の前位置透水試験における定圧注水試験の手順を変更し、図 4.2.3-3 の概念図に示すように、試験区間内に注水流量を段階的に上昇させ、その都度、安定した注水圧（水頭）から透水係数を求めた。

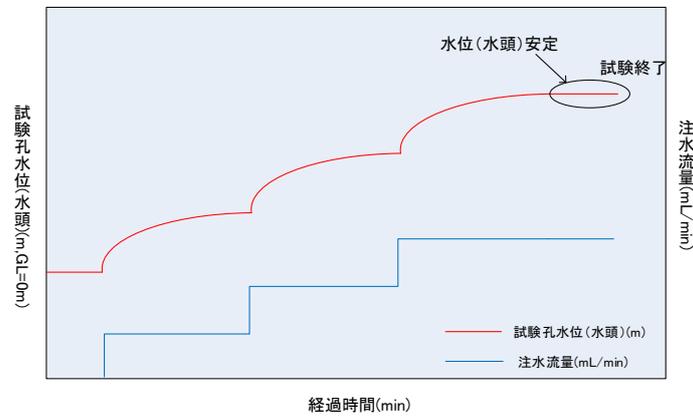


図 4.2.3-3 水理試験（定流量試験）の概念図

水理試験の試験ケースを表 4.2.3-2 に示す。

表 4.2.3-2 水理試験ケース

	ケース	試験区間 mm (孔底からの 距離)	備考	流量 (mL/min)
注 水 圧 試 験 実 施 前	ケース 1	0~230	緩衝材 2 段分の範囲が対象区間 試験体設置前に実施	200 ↓ 400 ↓ 600 ↓ 800
	ケース 2	0~430	緩衝材 4 段分の範囲が対象区間 試験体設置前に実施	
	ケース 3	0~630	緩衝材 6 段分の範囲が対象区間 試験体設置前に実施、試験孔口に鋼製カバ ー設置	
	ケース 4	0~746	緩衝材 6 段分+中蓋・上蓋の範囲を対象区間 試験体設置前に実施、試験孔口に鋼製カバ ー設置	
注 水 圧 試 験 実 施 後	ケース 3'	0~630	緩衝材 6 段分の範囲が対象区間 試験体回収後に実施、試験孔口に鋼製カバ ー設置	100 ↓ 200 ↓ 400 ↓ 600
	ケース 4'	0~746	緩衝材 6 段分+中蓋・上蓋の範囲を対象区間 試験体回収後に実施、試験孔口に鋼製カバ ー設置	

(3) 水理試験結果

1) 緩衝材流出試験実施前

a 注水流量と水位の関係

各ケースの試験区間の試験孔水位（水頭）と注水流量の経時変化を図 4.2.3-4~図 4.2.3-7 に示す。試験区間の試験孔水位（水頭）は、止水プラグの中央部バイパス内下部に設置した圧力計を用い、試験区間内の圧力から水位（水頭）に換算した。なお、試験坑道 5 の路盤コンクリート高さ（GL）を水位（水頭）0m とした。

試験孔水位（水頭）と注水流量の関係について整理したグラフを図 4.2.3-8 に示す。図より、各ケースともに、試験孔水位（水頭）と注水流量には強い相関があることがわかった。図中の数式は最小二乗法による近似直線の式、 R は相関係数を示す。

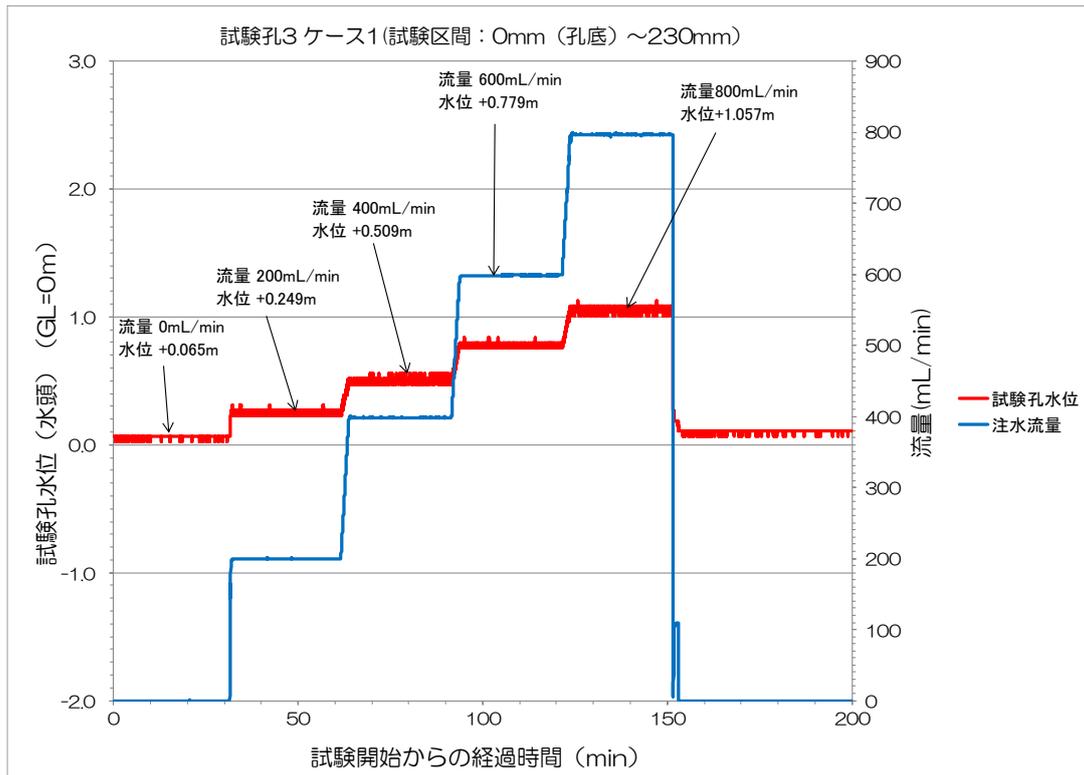


図 4.2.3-4 水理試験結果 試験孔水位 (水頭) と注水流量の経時変化 (ケース 1)

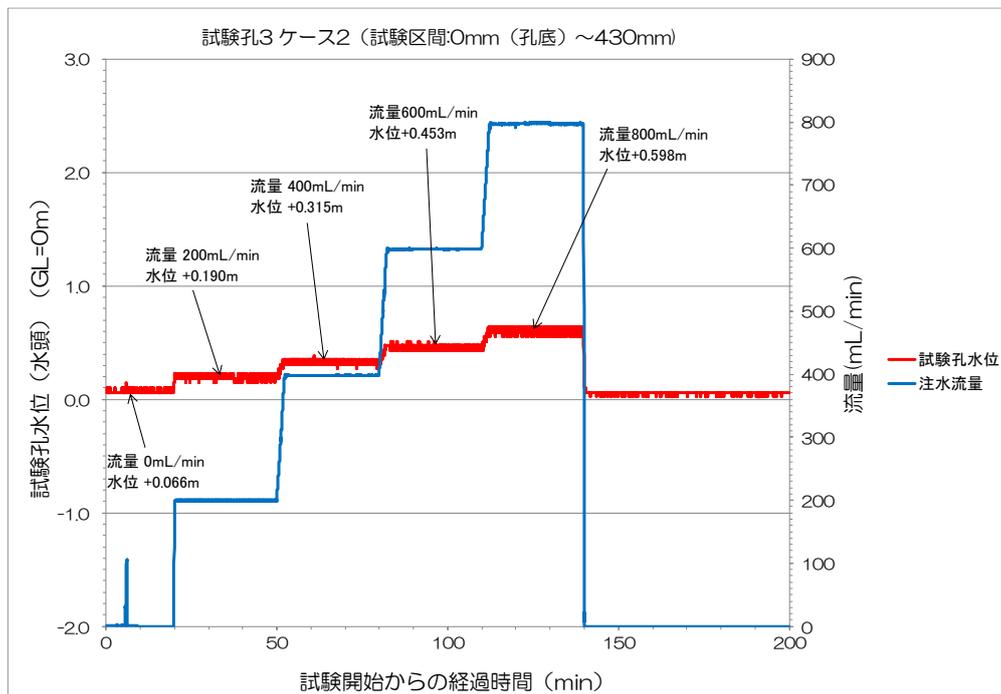


図 4.2.3-5 水理試験結果 試験孔水位 (水頭) と注水流量の経時変化 (ケース 2)

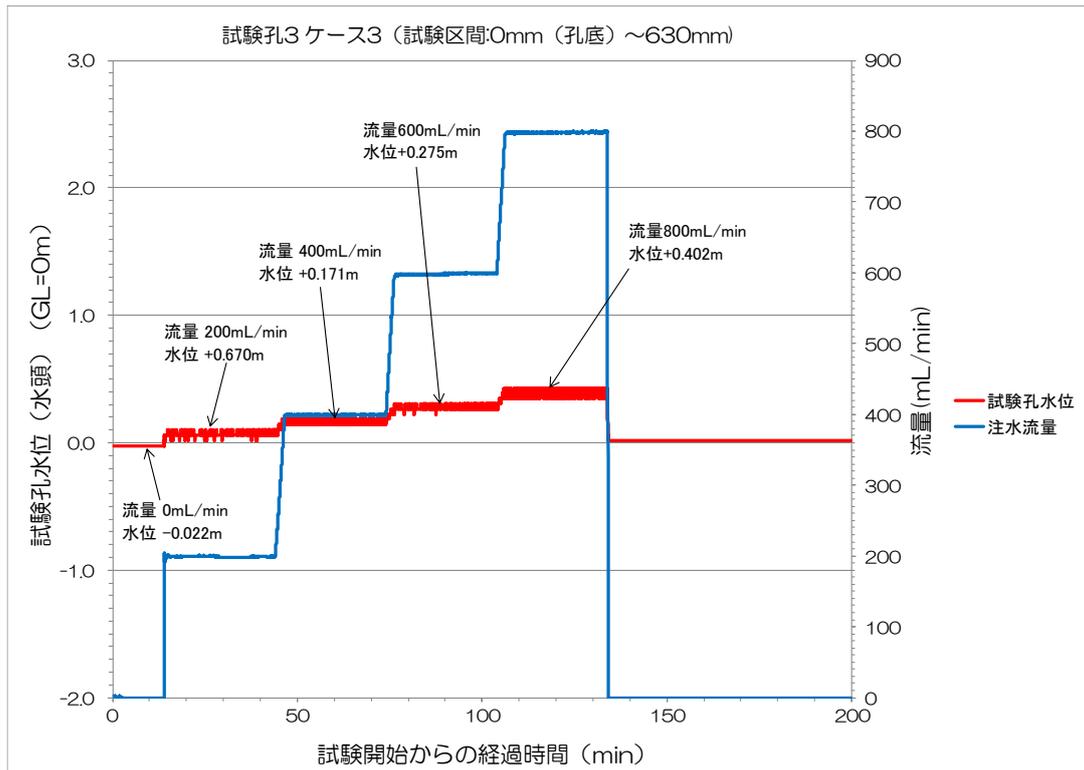


図 4.2.3-6 水理試験結果 試験孔水位 (水頭) と注水流量の経時変化 (ケース 3)

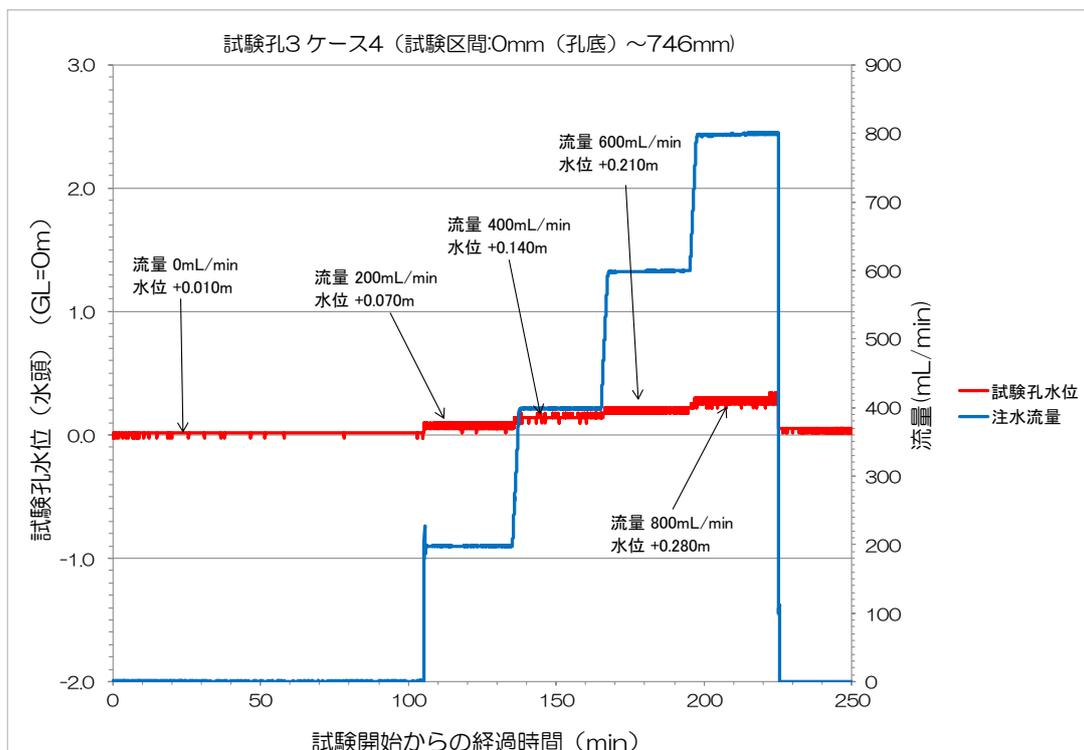


図 4.2.3-7 水理試験結果 試験孔水位 (水頭) と注水流量の経時変化 (ケース 4)

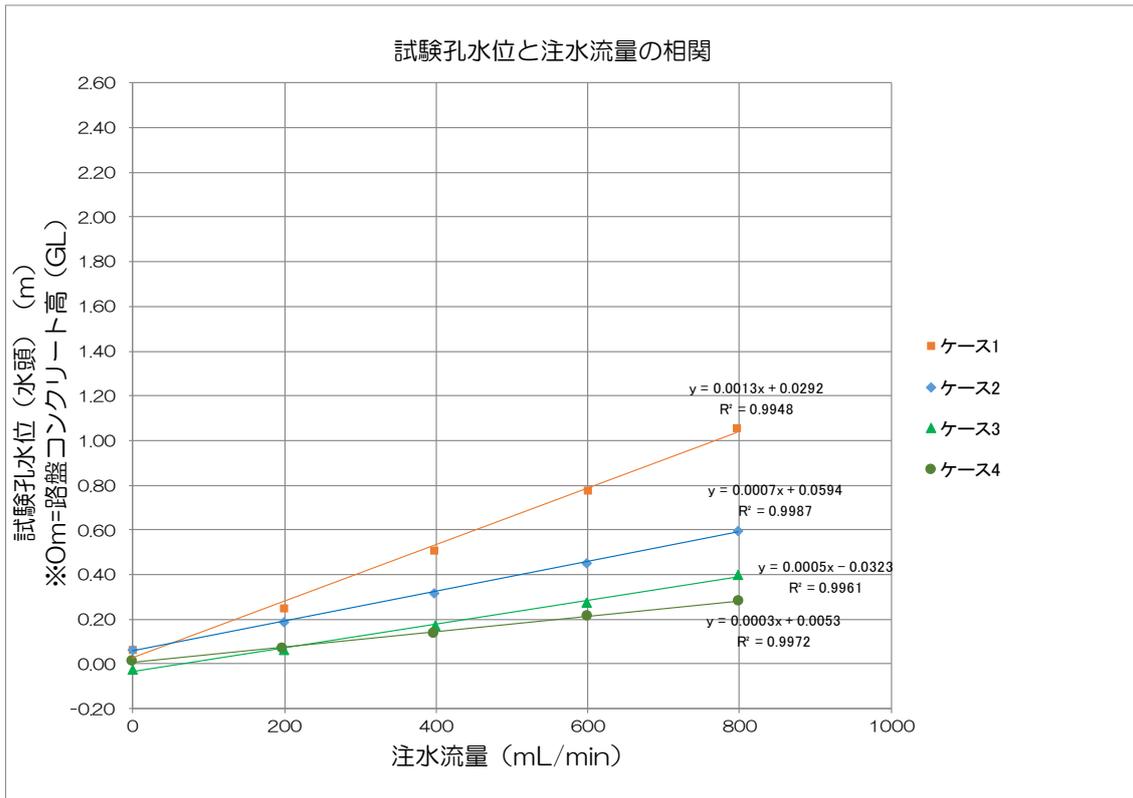


図 4.2.3-8 水理試験結果 試験孔水位（水頭）と注水流量の相関

b 透水係数の算出

各ケースの透水係数の算出結果を表 4.2.3-3、図 4.2.3-9 に示す。なお、透水係数は地盤工学会基準「単孔を利用した透水試験方法」[9]の、以下の定常式より算出した。

$$k(m/s) = \frac{Q}{2\pi sL} \ln \left[\frac{L}{D} + \left\{ 1 + \left(\frac{L}{D} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right]$$

k : 透水係数 (m/s)

Q : 注水量 (m^3/s)

L : 試験区間 (m)

D : 試験孔直径 (m)

s : 水位 (水頭) 変動量 (m)

表 4.2.3-3 水理試験の結果より、透水係数は $10^{-5} \sim 10^{-6}$ (m/sec) オーダーの結果であったことがわかる。

図 4.2.3-9 より、試験孔の上方区間を含むと透水係数が高くなる傾向があることがわかる。これより、試験孔 3 の上部区間の岩盤には、試験孔 3 の下部区間の岩盤よりも亀裂が多い、など透水性を上げる要因が存在すると思われる。

なお、 10^{-6} (m/sec) オーダーの透水係数は、幌延 PFI 事業における深度 350m 試験坑道 3 で実施している掘削影響試験[10]において、掘削影響領域と想定される岩盤の透水係数と同等の値である。また、稚内層の一軸圧縮強度は 5~25MPa とされており、今回の水理試験の圧力、すなわち水位（水頭）約 1.0m 相当の水圧（約 0.01MPa）による岩盤への影響はほぼ無いと判断した。

表 4.2.3-3 水理試験結果（緩衝材流出試験実施前）

ケース	透水係数 K (m/sec)	試験区間 L (mm) (孔底からの距離)	注水量 Q (ml/min)	水位（水頭） 変動量 S (m)	試験孔直径 D (m)
ケース 1	3.58×10^{-6}	0~230	796	0.992	0.58
ケース 2	6.34×10^{-6}	0~430	797	0.532	0.58
ケース 3	7.45×10^{-6}	0~630	797	0.424	0.58
ケース 4	1.13×10^{-5}	0~746	799	0.270	0.58

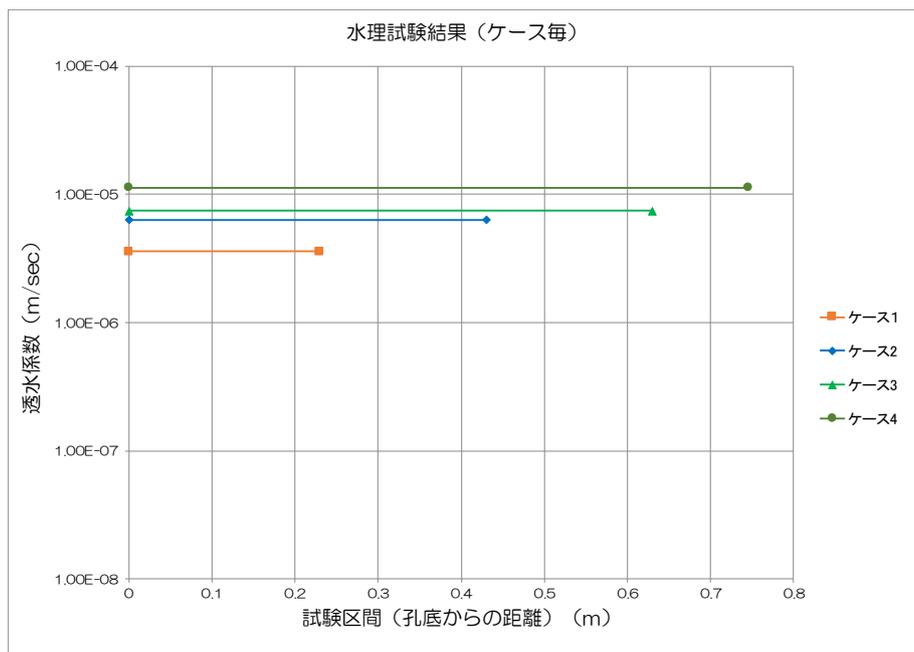


図 4.2.3-9 水理試験結果（緩衝材流出試験実施前）

2) 緩衝材流出試験実施後

a 注水流量と水位の関係

緩衝材流出試験実施後の試験区間（ケース 3'、ケース 4'）の試験孔水位（水頭）と注水流量の経時変化図を図 4.2.3-10～図 4.2.3-11 に示す（試験ケース概要については、前掲の表 4.2.3-2 を参照されたい）。図 4.2.3-10 より、流量を上げると水圧が一時的に上昇後、すぐに低下して一定値となることがわかる。また、図 4.2.3-11 に示す流量 600mL/min の場合には、時間とともに水圧が上昇する傾向にあることがわかる。これは、注水試験を実施した結果、緩衝材が流出し、岩盤中の水みちを目詰まりさせている可能性が考えられる。

緩衝材流出試験実施後のケース 3'、ケース 4' における試験孔水位（水頭）と注水流量の関係について整理したグラフを図 4.2.3-12 に示す。比較のため、緩衝材流出試験前に実施した水理試験の結果も併せてプロットした。図 4.2.3-12 より、ケース 3'、ケース 4' における試験孔水位（水頭）と注水流量にも、注水試験前と同様に、強い相関があることがわかる。

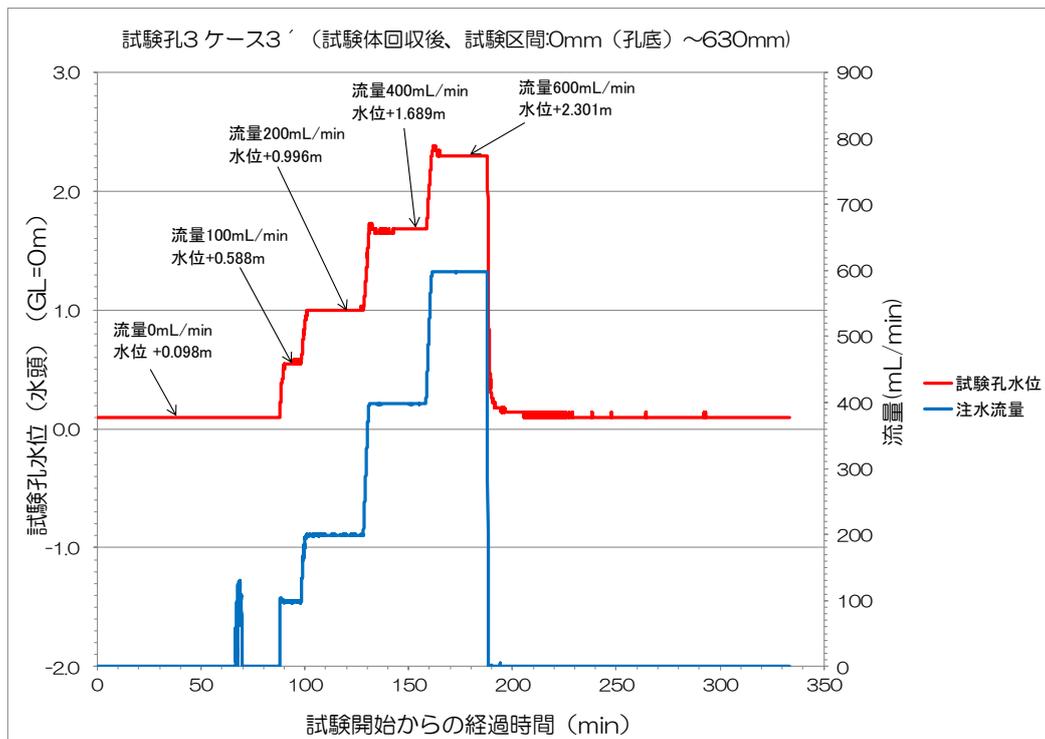


図 4.2.3-10 水理試験結果 試験孔水位（水頭）と注水流量の経時変化（ケース 3'）

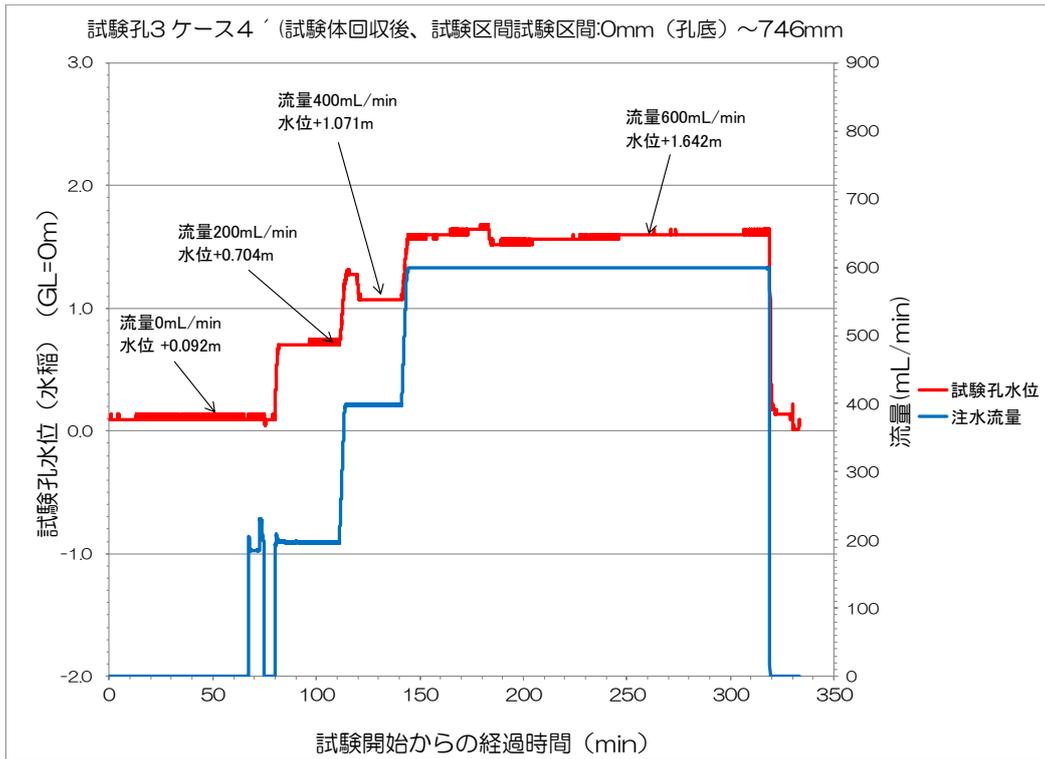


図 4.2.3-11 水理試験結果 試験孔水位（水頭）と注水流量の経時変化（ケース4'）

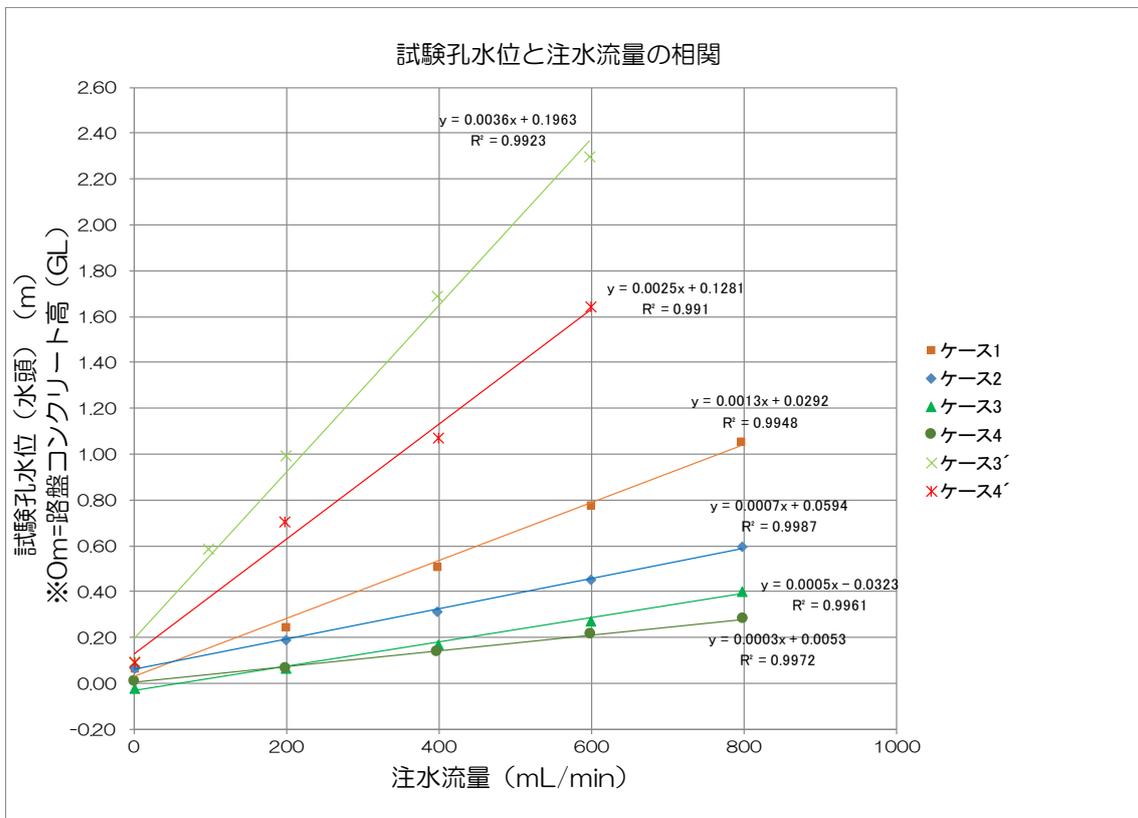


図 4.2.3-12 水理試験結果 試験孔水位（水頭）と注水流量の相関（全ケース）

b 透水係数の算出

緩衝材流出試験実施後の各試験区間の透水係数の算出結果を表 4.2.3-4、図 4.2.3-13 に示す。比較のため、緩衝材流出試験前における透水係数も併せて示した。

図 4.2.3-13 に示す緩衝材流出試験実施後の水理試験結果より、試験孔 3 周辺の岩盤の透水係数は、概ね 1.0×10^{-6} m/sec となったことがわかる。緩衝材流出試験実施後の透水係数は、試験実施前の透水係数よりも約 1 オーダー低くなったことがわかった。これは、緩衝材の影響、例えば緩衝材の膨潤や、流出した緩衝材による目詰まり、等の影響が周辺岩盤の透水性を下げたと考えられる。

表 4.2.3-4 水理試験結果（全ケース）

	ケース	透水係数 K (m/sec)	試験区間 L (mm) (孔底からの距離)	注水量 Q (ml/min)	水位（水頭） 変動量 S (m)	試験孔直径 D (m)
緩衝材流出試験 実施前	ケース 1	3.58×10^{-6}	0~230	796	0.992	0.58
	ケース 2	6.34×10^{-6}	0~430	797	0.532	0.58
	ケース 3	7.45×10^{-6}	0~630	797	0.424	0.58
	ケース 4	1.13×10^{-5}	0~746	799	0.270	0.58
緩衝材流出試験 実施後	ケース 3'	1.08×10^{-6}	0~630	598	0.630	0.58
	ケース 4'	1.47×10^{-6}	0~746	600	0.746	0.58

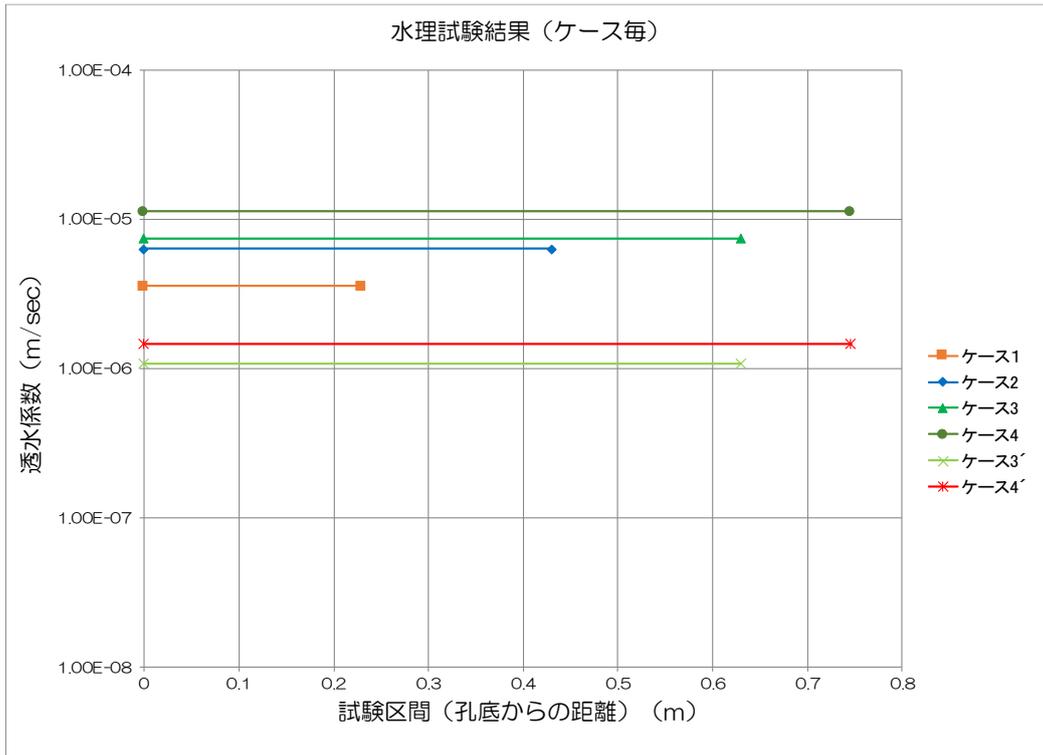


図 4.2.3-13 水理試験結果（緩衝材流出試験実施前と実施後）

4.2.4 緩衝材流出試験（定流量注水試験）

(1) 試験設備について

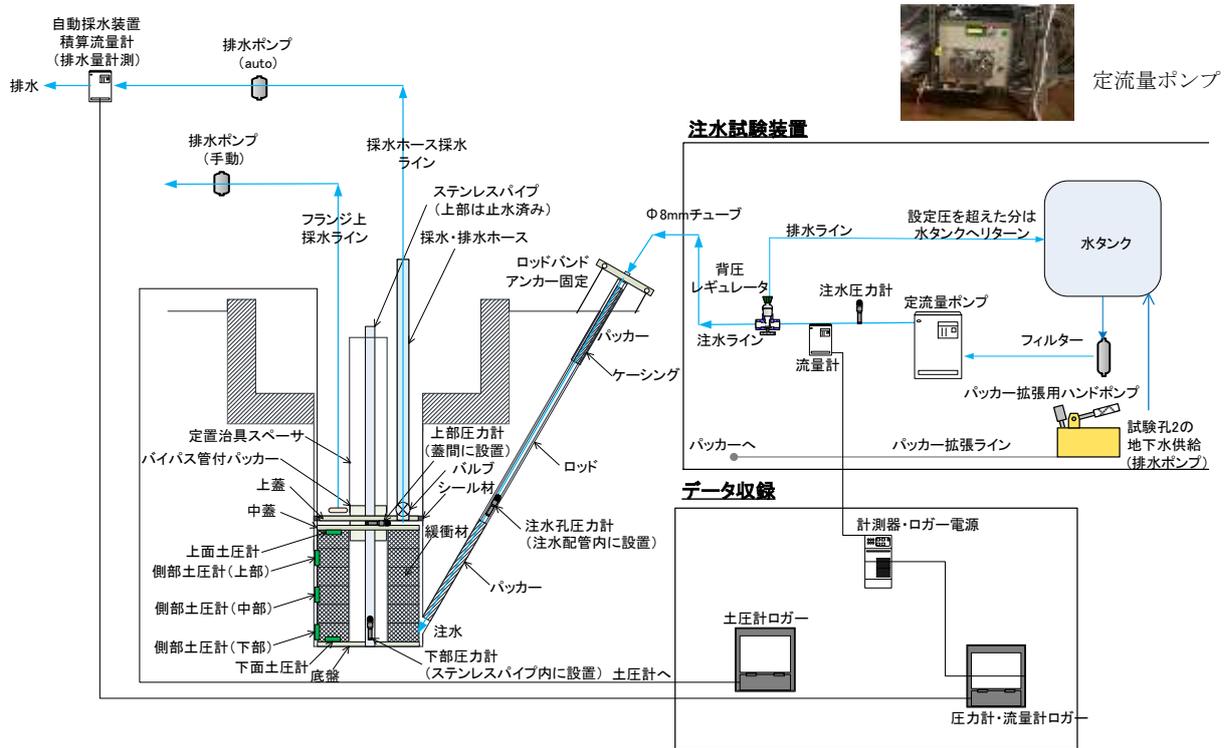
1) 注水・計測設備

緩衝材流出試験のための注水設備と計測設備を図 4.2.4-1 に示す。注水した水は、事前に水タンクに溜めた試験孔内の湧水で、定流量の HPLC ポンプにより流量計を経てチューブで注水孔内まで送られた。注水孔内は上部と下部の 2 つのパッカーにより遮水されており、注水は下部パッカーより奥の注水孔下部（試験孔との交差部）から行われた。試験孔内の水の採取や排出は、上蓋に取り付けられた採水・排水ホース内に通したチューブホースをマグネットポンプに接続して行った。マグネットポンプによる採水は、併設した自動採水装置を用いて行い、設定した時間に採水を行い、それ以外の時間は排水される仕組みとした。

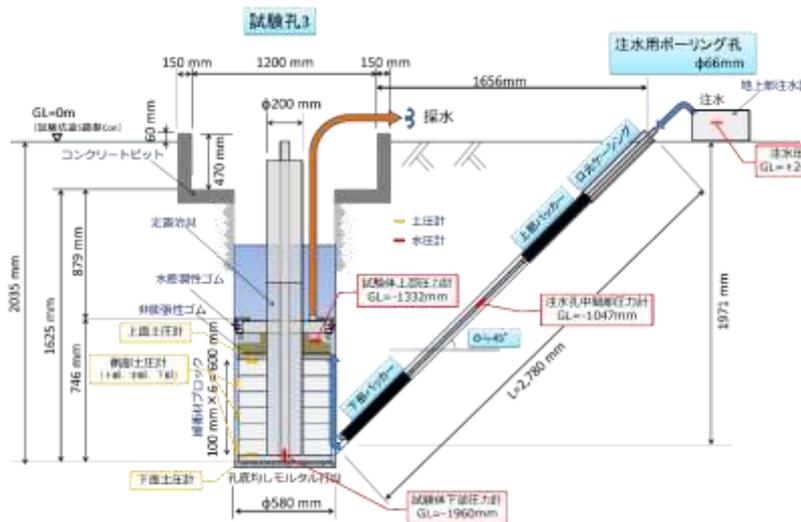
試験孔内の湧水は、上蓋に設置されたシール材により、上蓋より上部の孔壁面からの湧水と、上蓋より下部からの湧水に分離した。本試験に使用した装置の仕様を表 4.2.4-1 と表 4.2.4-2 に示す。

計測器は、緩衝材の膨潤圧を計る土圧計（計 5 箇所）、注水孔圧力計（水位計）、試験孔下部の圧力計（水位計）、試験孔上部の圧力計（水位計）の他、地上には注水条件を確認する圧力計、流量計、そして排水量を測定する積算流量計とした。各計測機器の設置位置を図 4.2.4-1 に示す。また、注水孔に設置するパッカーと圧力計（水位計）の組立状況を図 4.2.4-2 に、設置完了状況

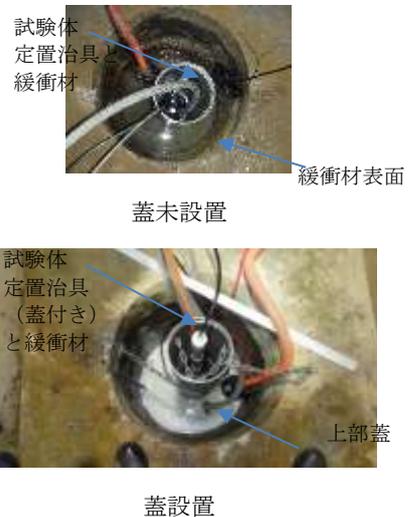
を 図 4.2.4-3 に示す。



(a) 試験設備



(b) 主な試験設備の規模



(c) 試験孔内の試験体・試験孔を真上から見た

図 4.2.4-1 注水試験装置

表 4.2.4-1 緩衝材流出試験に使用した装置の仕様 (1)

種別	名称	主な仕様	数量	備考
注水・排水機構 および計測部	パッカー	外径:56mm, ラバー外径:56mm 最大拡張:86mm ラバー長 550mm マントレル内径:20mm 全長:930mm	2	アサノ大成基礎エンジニアリング社製
	ロッド	配管用ステンレス鋼管:25A	1	
	ロッドバンド	上記ロッド用ロッドバンド	1	
	水タンク	注水ポンプ用, 容量:2000ℓ	2	既設利用 (注水ポンプ用タンク)
	注水ポンプ	HPLC(高速液体クロマトグラフィー) 最大流量:1000ml/min 最大圧力:10Mpa 定流量設定範囲:10~1000ml/min	1	日本精密化学:NP-GX-1000
	注水用水タンク (定圧注水時)	容量:20L, 耐圧:1MPa 材質:ステンレス鋼	1	アサノ大成基礎エンジニアリング社製
	精密レギュレータ (定圧注水時)	設定圧力:0.01~0.8MPa 設定感度:フルスケールの0.2%以内 繰り返し性:フルスケールの±0.5%以内	1	SMC:IR2020
	圧力計(水位計) (注水孔中間部、試験孔上部、試験孔下部、地上部)	圧力変換器レンジ:0~2MPa 精度:±0.04%FS(BSL) 出力:0~5V	4	GE センシング & インスペクション・テクノロジー モデル名:PMP5033
	データ表示・収録装置	タッチ型ペーパーレスレコーダー 5.7型 TFT 液晶 本体フラッシュメモリー 700MB	1	KEYENCE:TR-W500

表 4.2.4-2 緩衝材流出試験に使用した装置の仕様 (2)

種別	名称	主な仕様	数量	備考
注水・排水機構および計測部	データ表示・収録装置	高精度温度電圧計測ユニット, 入力 8ch AD 分解能:16bit サンプリング周期 10ms~10min 入力種類:電圧,熱電対,測温抵抗体	1	KEYENCE:TR-TH08 (KEYENCE:TR-W500 と組み合わせて使用)
	データ表示・収録装置	パルス計測・入出力ユニット, 入力 4ch パルスカウント範囲/間隔: 0~65535 カウント/サンプリング周期	1	KEYENCE:TR-C48 (KEYENCE:TR-W500 と組み合わせて使用)
	流量計 (注水流量)	コリオリ式 定格範囲:0~2000cc/min 精度:0~25%ofF.S.時±1%ofF.S., 25~100%ofF.S.時±0.5%ofF.S. 出力:パルス出力、4-20mA 出力	1	KEYENCE:FD-SS2A
	排水用積算 流量計 (上部蓋上湧水用)	クランプオン式デジタル流量センサ 定格流量:100L/min 表示分解能:0.1L/min 精度/F.S.:±1.5%(応答 1s 時) 出力:パルス出力、4-20mA 出力	1	KEYENCE:FD-Q20C
	排水用積算 流量計 (排水ホース用)	電極非接液型 電磁式流量センサ 定格流量:10L/min 表示分解能: 0.05L/min 精度/F.S.:±3.5%(応答 1s 時) 出力:パルス出力、4-20mA 出力	1	KEYENCE:FD-M5AT
	スクリーン式 フィルター	メッシュ#130(130 ミクロン、0.13mm)	1	サンホープ:AKY385-25 地下水の水タンクへの給水時 使用(ポンプ 故障防止)
	カートリッジ式 フィルター	PP(ポリプロピレン)カートリッジフィルター サイズ:20 インチ, ろ過精度:50(μm)	1	アズワン ポンプへの給水時使用(ポンプ 故障防止)
	土圧計	容量:2MPa, 定格出力:約 0.5mV/V (1000×10 ⁻⁶ ひずみ) 非直線性: 2%RO サイズ:φ50mm、厚さ:11.3mm	5	東京測器:KDE-2MPA
	土圧計カバ	測定点数:1 点(TC-32K 単体) 5 点(CSW-5B 付属) 測定速度:0.08 秒/点 (TC-32K 単体) 分解能:1×10 ⁻⁶ ひずみ 確度(23°C±5°C): 0.28%rdg+1digit	1	東京測器:TC-32K 外部スイッチボックス CSW-5B 付 属
	採水装置	採水可能点数:10 点 方式:タイマーによる採水 マグネットポンプにより採水、タイマーと電磁弁により任意の時刻に採水可能	1	アサノ大成基礎エンジニアリング社 製
	排水ポンプ	最大吐き出し容量:0.06m ³ /min	1	鶴見ポンプ:LSP 型
定流量採水 ポンプ	流量レンジ 0~100mL/min	1	SIMDOS:FEM 型	



図 4.2.4-2 注水区間のパッカー、圧力計（水位計）組立状況



(a) 地上部



(b) 試験孔部の注水口拡大

図 4.2.4-3 注水区間のパッカー、圧力計（水位計）設置完了の状況

注水孔内の下部のパッカー位置は、注水孔最下部（約 2.5m）の割れ目が水みちとなることによる注水試験への影響を排除するために、当該の割れ目を塞ぐ位置に設置した。試験孔内の孔壁写真によるパッカーの設置位置を図 4.2.4-4 に示す。参考までに、H28 年度のパッカー設置位置も併せて示した。

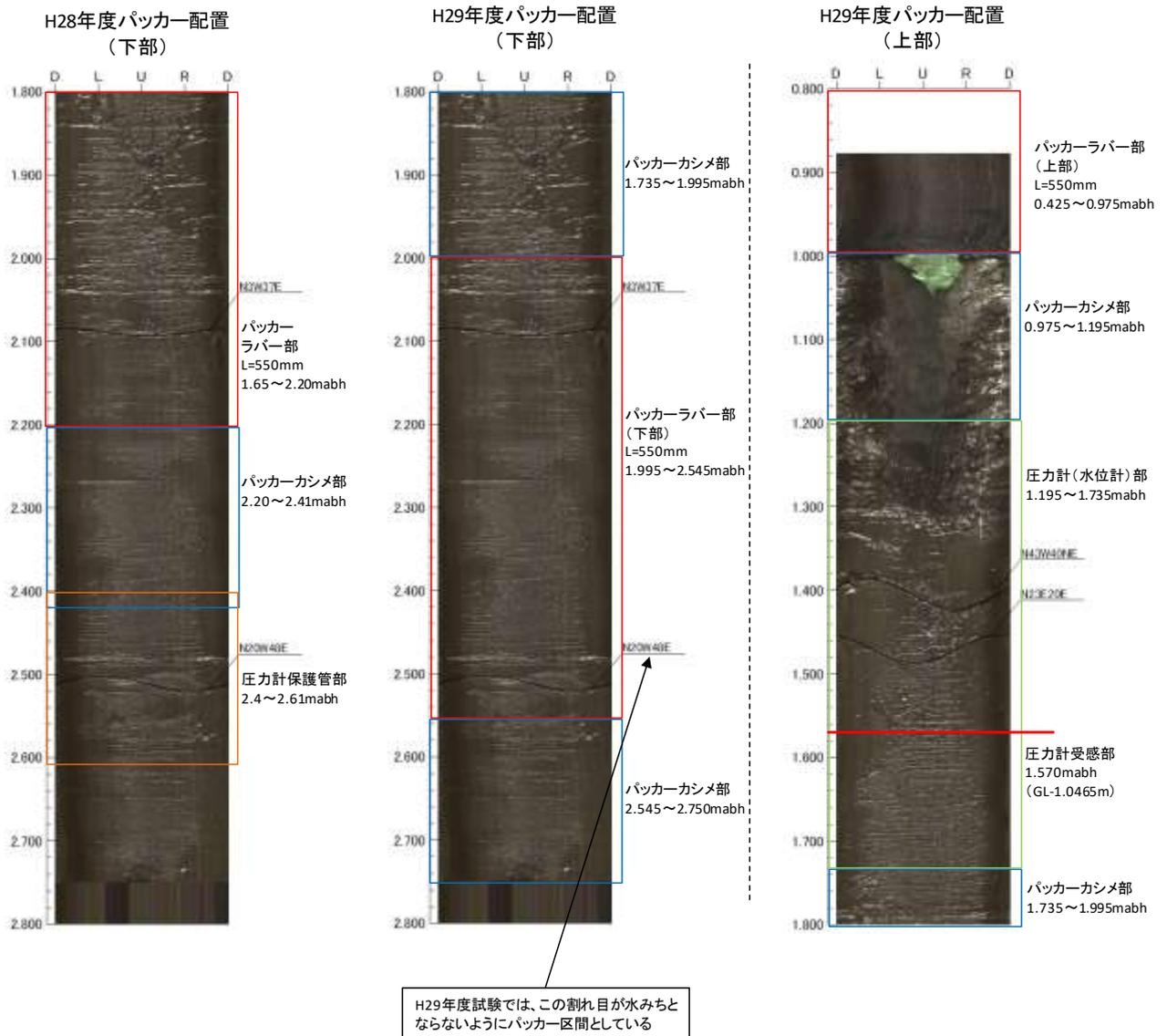


図 4.2.4-4 注水孔内のパッカー設置位置

2) 試験体の組立

今年度の試験についても昨年度までと同様に、乾燥密度（膨潤前）を 1.92 Mg/m^3 とした緩衝材ブロックを使用した。試験体は緩衝材ブロックを図 4.2.4-5～図 4.2.4-7 に示すように、定置治具上に 48 個（8 個／段×6 段）を積み上げた。緩衝材ブロックの仕様を表 4.2.4-3 に、形状を図 4.2.4-8 に示す。また、定置治具の仕様を図 4.2.4-9 に示す。緩衝材の製作方法は平成 26 年度で製作した方法を踏襲しているので、その際の報告書[5]を参考のこと。



図 4.2.4-5 試験体の組立状況



図 4.2.4-6 試験体の組立状況



図 4.2.4-7 試験体の組立状況

表 4.2.4-3 緩衝材ブロックの仕様

ブロック製作に係る仕様		
材料	ベントナイト（クニゲル V1）70wt%+ケイ砂 30wt%	
乾燥密度	膨潤後	1.6Mg/m ³
	膨潤前	1.9Mg/m ³
含水比	10%	
ブロックの形状に係る仕様		
形状と数量	ドーナツの 8 分割型ブロック×48 ブロック	
寸法	外径 0.54m、内径 0.21m、厚さ 0.10m (1 段あたり、これを 8 分割)	
重量	5.1kg/ブロック	

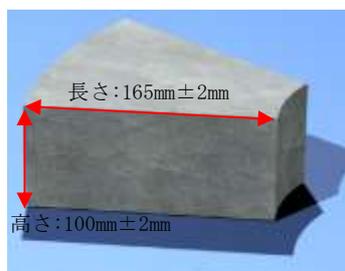


図 4.2.4-8 緩衝材ブロックの形状

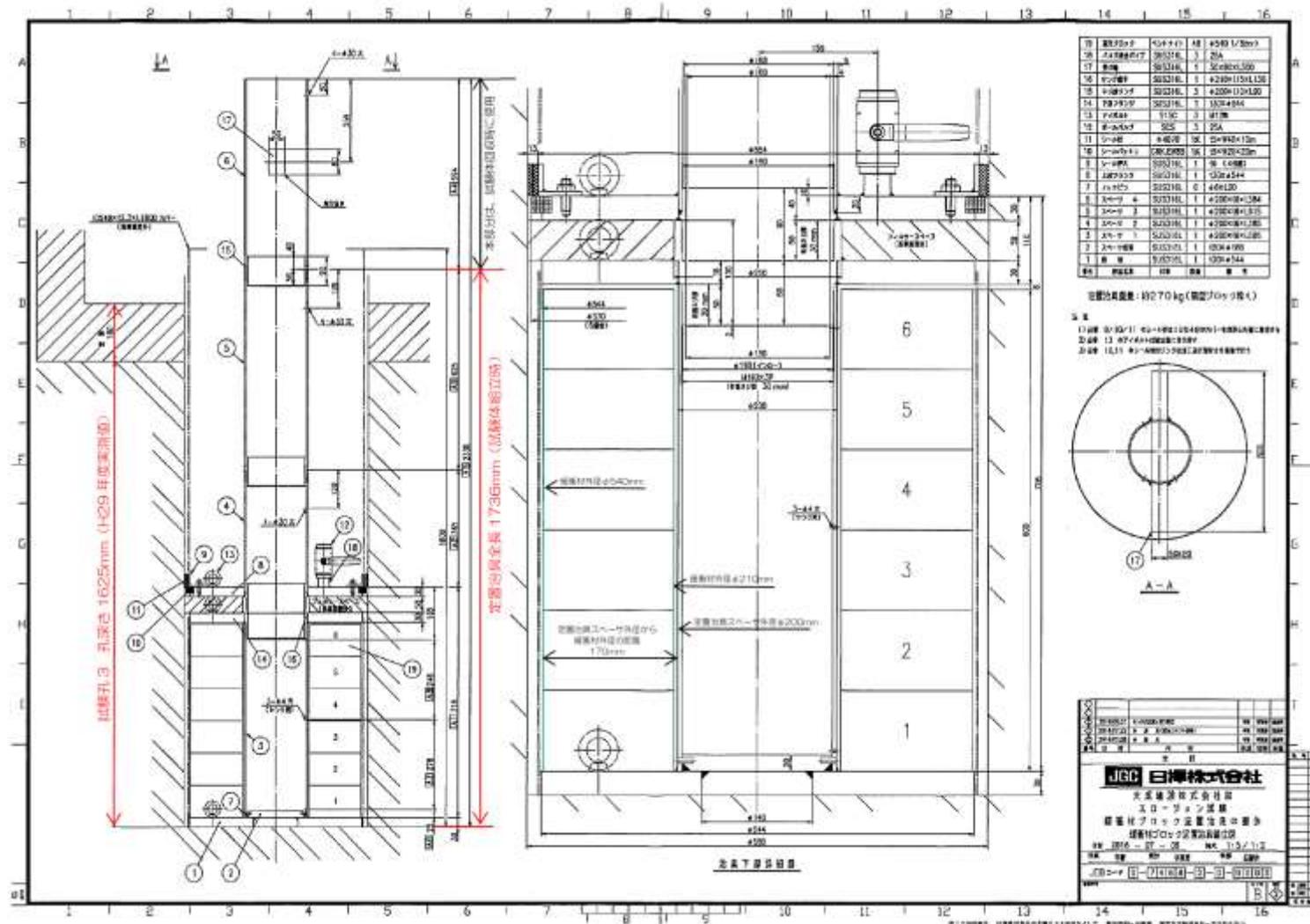


図 4.2.4-9 定置治具の仕様

なお、試験終了後に実施する緩衝材ブロック回収の際にブロック同士を分離しやすくするために、あらかじめ、試験体の組み立て時に中蓋側部に図 4.2.4-10 に示す目印（黄色楕円内参照）を付けた。併せて、緩衝材ブロック間の境界の一部に図 4.2.4-11 に示す油性マーカによる目印（赤線）も付けた。



図 4.2.4-10 緩衝材ブロック間の中蓋側部へのマーキング状況



図 4.2.4-11 緩衝材ブロック間の境界の一部に油性マーカによるマーキング状況

上蓋と中蓋間の空間には非膨張性のゴム材を設置し（図 4.2.4-12 参照）、デッドスペースを減少させた。ゴムには、試験孔内の湧水を試験体の内側に導水するため、試験体の内側から外側まで貫通する孔を複数個設置した。

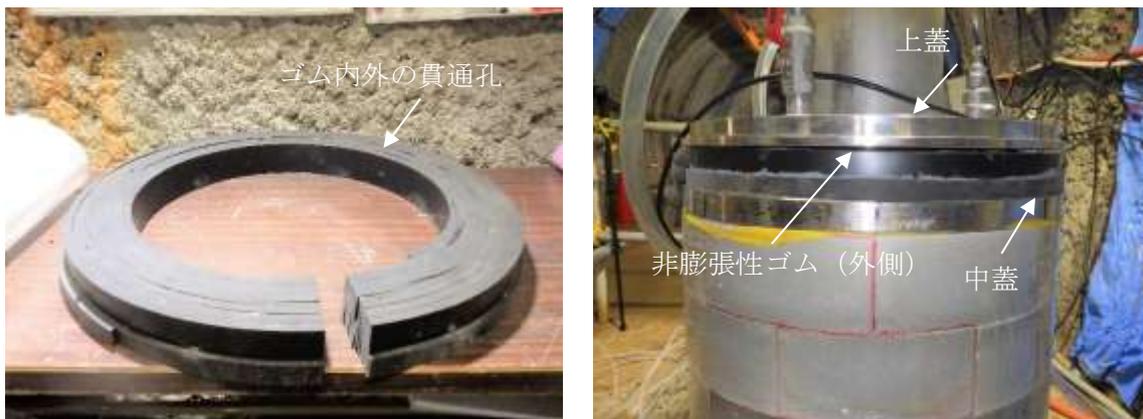


図 4.2.4-12 上蓋・中蓋間のデッドスペースへのゴム設置状況

3) 土圧計の設置

試験体の最上部と底面、および側面に土圧計を設置した。

a 上面と下面（底面）の土圧計設置

積み上げた緩衝材ブロックの上面および下底（底面）（図 4.2.4-13 参照）に、土圧計とその付属ケーブルを設置するための溝加工を行った。緩衝材ブロックの中に埋め込んだ上部と下部の土圧計の設置位置を図 4.2.4-14 に示す。また、土圧計設置用の溝の加工状況を図 4.2.4-15 に示す。緩衝材ブロックに施した溝と土圧計およびケーブル間の隙間は、緩衝材ブロック製作時に使用したベントナイトと珪砂の混合材を水で練った材料で充填した。図 4.2.4-16 に、土圧計設置状況を示す。

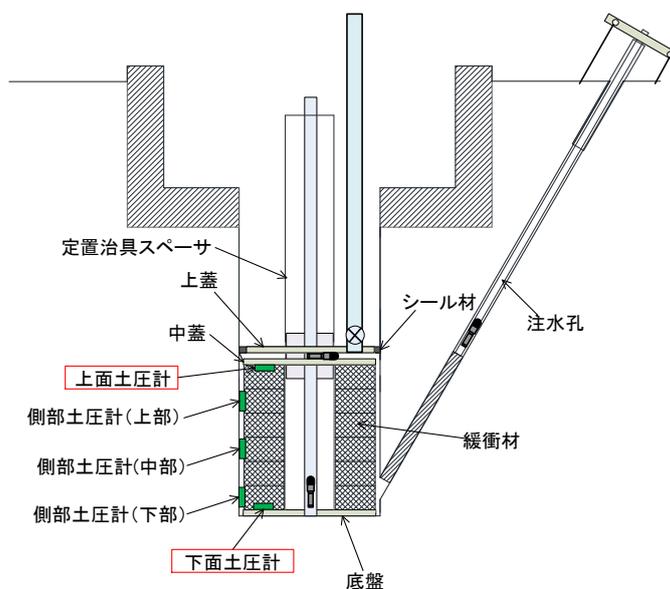


図 4.2.4-13 土圧計設置位置

緩衝材外周



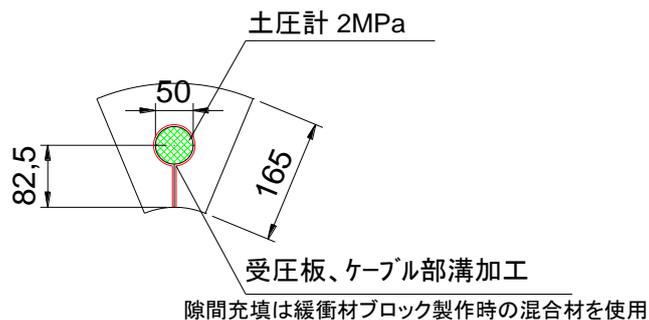


図 4.2.4-14 緩衝材ブロックの内部に埋めた上下の土圧計の設置位置



図 4.2.4-15 緩衝材ブロック溝加工状況



図 4.2.4-16 土圧計設置状況

b 側部の土圧計設置

側部土圧計の設置位置説明図を図 4.2.4-17 に示す。側部の土圧計は、図 4.2.4-18、図 4.2.4-19 の設置状況に示すように SUS の保護管にケーブルを通した状態で試験体と試験孔の隙間に差し込み、試験孔 3 の南側の孔壁沿いに吊るして設置した。側部土圧計は、上部・中部・下部の 3 箇所

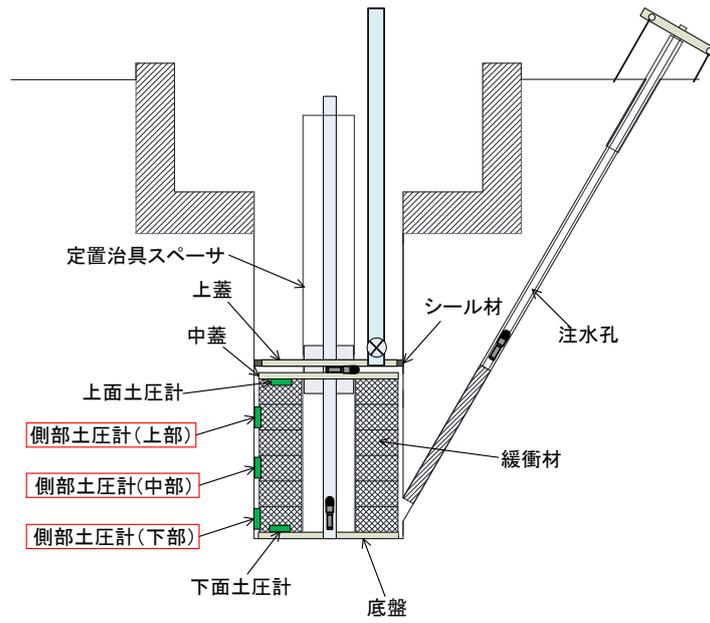


図 4.2.4-17 側部土圧計設置位置 説明図



図 4.2.4-18 保護管に通した側部土圧計

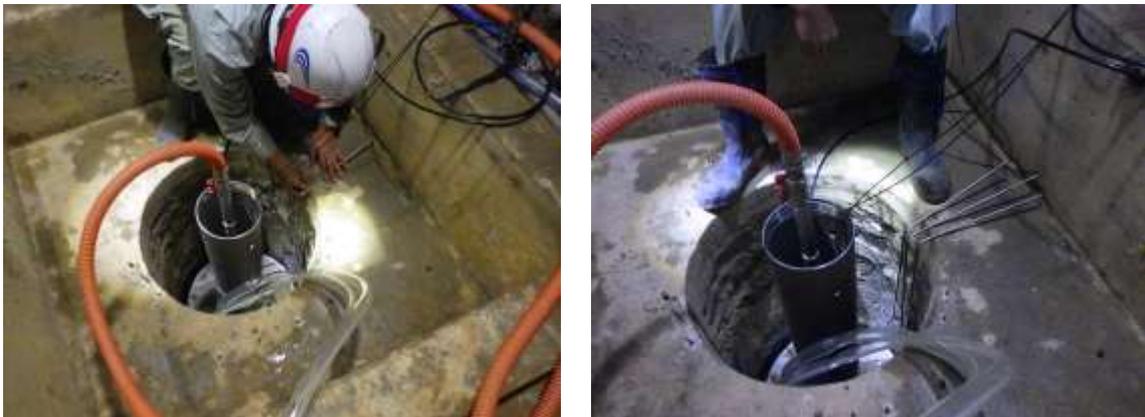


図 4.2.4-19 側部土圧計の設置状況

4) 試験体と孔壁の間の止水

試験体と孔壁間の止水を以下の手順により実施した。図 4.2.4-20 に止水施工の概念図を示した。また、使用したシール材を表 4.2.4-4 に示す。

まず、水膨潤性ゴムを孔壁と上蓋との間に設置し、一液性水膨潤弾性シール材を水膨潤性ゴムの上に塗布した。次に、押さえ板をねじで緩く止めた後に押さえ板を少し持ち上げ、一液性水膨潤弾性シール材を上から押えこむように、押さえ板を試験孔壁面側に押した状態でネジを締めた。さらに、水膨潤性ゴムと一液性水膨潤弾性シール材の膨潤がほぼ終了するのを目視確認した後に、ウレタン型の一液型止水材を用いて、残存する狭い隙間を止水した。

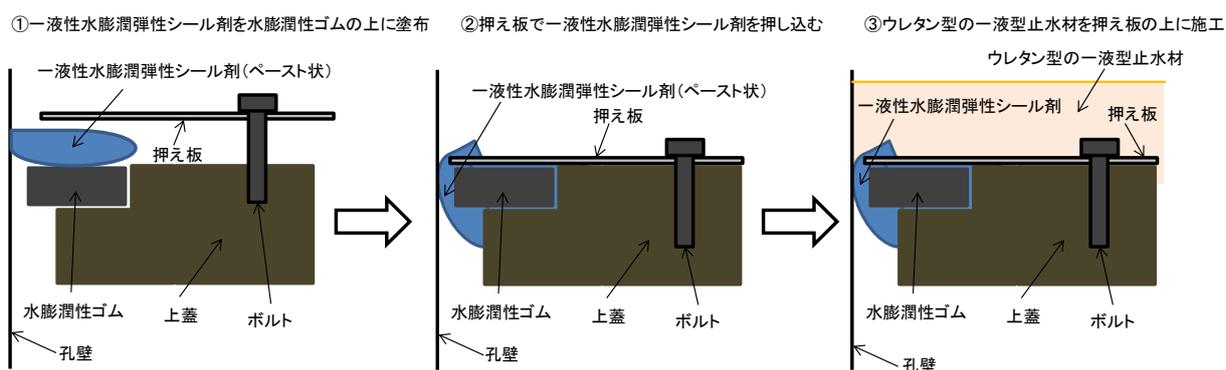


図 4.2.4-20 試験体と孔壁間の止水施工の概念図

表 4.2.4-4 使用したシール材

種類	名称	製造会社
水膨潤性ゴム	ナイスシール B 型	(株)応用計測サービス
一液性水膨潤弾性シール材	ポリシーラーUK	スリーボンドユニコム(株)
ウレタン型 一液型止水材	サンストッパーF	大日化成(株)

5) 採水試料の吸光度分析

a 採水設備の設置

試験体上部に蓋を設置し、その外周と試験孔壁面との間を止水することによって、試験孔内の湧水（緩衝材と接触する）を、蓋より上方からの湧水と分離した。試験孔内の湧水の採水設備のうち、試験孔の蓋の上に溜まる試験孔上部の湧水の採水には残水ポンプを使用した。

試験体設置直後から約 2 ヶ月の膨潤圧測定期間は、コンクリートピット内の湧水の常時排水は行わず、周辺岩盤の間隙水圧とほぼ同等の条件を保つこととし、採水時のみ残水ポンプを使用した。

蓋より下の水の採水は、排水ホース内に採水用のチューブホースを通し、マグネットポンプ（図 4.2.4-21）で連続的に採水した。採水量は、適宜、採水状況を勘案して決定した。その結果、試験

体設置から約 430 時間後（注水試験（予備）実施中）までの初期には 25ml/min としたが、それ以降から試験体回収までの試験では 11ml/min とし、水枯れさせることなく継続的に採水した。夜間および休日の採水は、三方電磁バルブ（図 4.2.4-22）とタイマー（図 4.2.4-23）を組み合わせた自動採水システムを用いた。



図 4.2.4-21 自動採水装置 マグネットポンプ

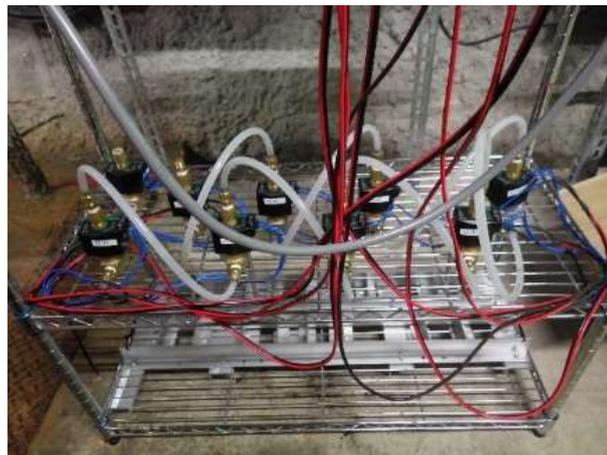


図 4.2.4-22 自動採水装置 電磁バルブ



図 4.2.4-23 自動採水装置 タイマー

b 採水分析方法

採水のベントナイト濃度を、流出した緩衝材の濃度とし、ベントナイト濃度を吸光度分析によって測定した。

吸光度分析は、特定の波長の光（単色光）を溶液試料に照射した際、透過した光の量を測定し、試料が吸収した光（吸光度）を分析する方法であり、試料中に対象物質が多いほど、多量の光が吸収される。つまり、吸光度は溶液の濃度に比例するため、あらかじめ標準試料の検量線を作成することにより、溶液の濃度の算出が可能となる分析法である。そのため、測定時には濃度むらが生じないように、分散器によって対象物質を十分に分散させる必要がある。

(a) 使用機械

本業務の吸光度分析においては、「株式会社 島津製作所製 紫外可視分光光度計 UVmini-1240 (図 4.2.4-24、表 4.2.4-5 参照)」および「株式会社 エスエムテック製 超音波分散機 UH-50 (表 4.2.4-6 参照)」を用いた。UVmini-1240 は波長範囲が 190～1,100nm と広く、通常の純水での測定と比較して不確定な物質が混入している可能性のある幌延の地下水の測定において有効であると考えられるため採用した。ベントナイトの主要鉱物であるモンモリロナイトの吸光度の変化率が最も大きくなると考えられる 300nm についてもカバーしている。



図 4.2.4-24 分光光度計 UVmini-1240

表 4.2.4-5 分光光度計仕様

製造者	(株)島津製作所
型名／型番	UVmini-1240
測光方式	シングルビーム測光方式
波長範囲	190～1,100 nm
スペクトルバンド幅	5 nm
測光レンジ	吸光度-0.3～+3.0ABS 透過率 0.0～200%
記録レンジ	吸光度-3.99～+3.99ABS 透過率-399～+399%
光源	1. 波長と連動した光源自動切替 (295～364nm) 2. 切替なしのハロゲンランプ (W1) のみ使用 3. 切替なしの重水素ランプ (D2) のみの使用
ディスプレイ	LED バックライト液晶モニタ
セル	120mm×90mm 320 ドット×240 ドット
本体サイズ	416(W)×379(D)×274(H) (mm)

表 4.2.4-6 超音波分散器仕様

製造者	(株)エスエムテ
型式	UH-50
出力	50 W
周波数	20 kHz
発信機能	連続・ハンドパルサー（手元スイッチ）
付属チップ	φ6 マイクロチップステップ型(MS-6)
電源	AC100V 50/60 Hz
外形寸法	発振器：182W×320D×110H (mm)
	振動子：32□×297H (mm)
重量	発振器：約 4 kg
	振動子：約 160 g

(b) 検量線の作成

ベントナイト濃度と吸光度の関係を示す検量線を図 4.2.4-25 に示す。以下に、実施した検量線の作成について述べる。なお、季節変動等の外乱による現地地下水の変化に伴う測定誤差を低減するため、キャリブレーション、および検量線取得の作業は現地の地下水で実施した。試料の調製方法については、地盤工学会基準（JGS0251-2009）[11]の方法を基本とした。

- ①現地地下水を使ってバックグラウンドの測定を行った。なお、現地地下水には分散剤（片山化学工業製ミラクル DP-200）を添加し、マグネティックスターラで十分に攪拌するようにした。
- ②現地地下水に緩衝材サンプルを加えて濃度が既知の検量溶液について、複数の濃度の溶液を作成した。希釈する場合には、バックグラウンドの状態を統一するため、希釈水には現地地下水を用いた。
- ③②で作成した複数の濃度の溶液を用いて吸光度分析を行い、①のバックグラウンドの結果も踏まえて検量線（濃度と強度の相関）を取得した。

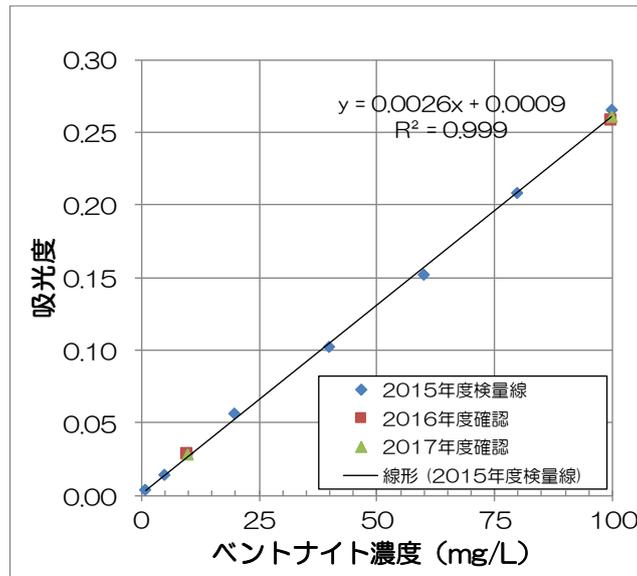


図 4.2.4-25 吸光度分析 検量線

(c) ベントナイト濃度の測定

採水した試料は、吸光度分析器の容器に移して超音波等で分散させ、吸光度分析法によって試料中に含まれるベントナイトの濃度を測定した。以下に濃度測定方法を示す。

- ①採取した試料は 250mL の採水ボトルに保存した。測定には、この採水ボトルから必要量をビーカーに移し、分散剤を入れた。
- ②マグネットスターラーで 20 分間攪拌した。最後の 5 分間は超音波分散器も併用して攪拌した。
- ③攪拌後は溶液中に攪拌しきれないベントナイトが残っていないか確認して、石英ガラスセルに入れ吸光度分析を行った。ベントナイトは沈殿しやすいため、攪拌後はすみやかに吸光度分析を行った。
- ④求められた吸光度から検量線を用いてベントナイト濃度を算出した。

(2) 緩衝材流出試験の手順

緩衝材流出試験のフローを、図 4.2.4-26 に示す。図に示すように、注水試験を実施する前に、緩衝材を膨潤させる期間をとった。

注水方法は水理試験と同様に、定流量注水による試験として実施した。最初に段階的に増やす注水流量を決めるための予備試験を実施した。予備試験は 10mL/min の定流量試験から開始し、圧力の安定後、20mL/min に流量を増加させ、順次 30mL/min、40mL/min と段階的に流量を増加させた (図 4.2.4-27 の説明図参照)。予備注水試験から流量と圧力上昇量のおおよその関係を調べた。

予備試験終了後に定流量試験を実施した。定流量試験であっても、水压を安定させた後に段階的に上昇させ、エロージョン (破過) が生じる圧力を調べた。1 段階の圧力上昇量を約 0.05MPa 程度となるよう流量を調整し、1 試験につき 4 段上昇させた。なお、1 段階の流量 (圧力上昇量) は予備試験の結果から決定した。定流量注水試験において、パイピングが発生したと判断した際

には、まずは注水圧力の低下を確認し、低下した圧力が一定期間安定するまでは注水を続けた。

図 4.2.4-28 に定流量注水試験の装置の説明図を示す。水タンクから注入した水が、水圧計と流量計を通過後、注水孔に設置してあるパッカーの管内を通り、注水孔の先端から試験孔に流入されるように装置は設計された。また、圧力計、流量計のデータは各ロガーに記録された。

注定流量注水は流量ポンプで流量を設定後、注水を開始し、定期的に採水用ホースから採水を行った。

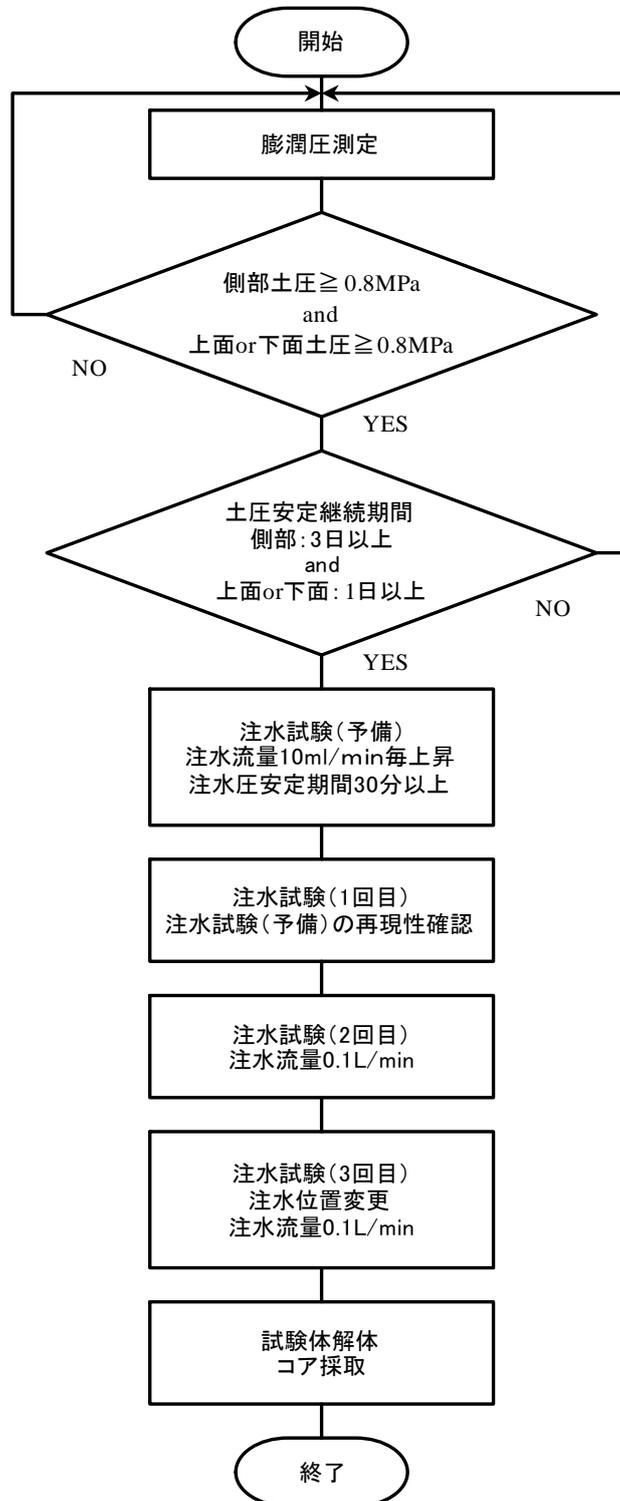


図 4.2.4-26 緩衝材流出試験フロー
4-67

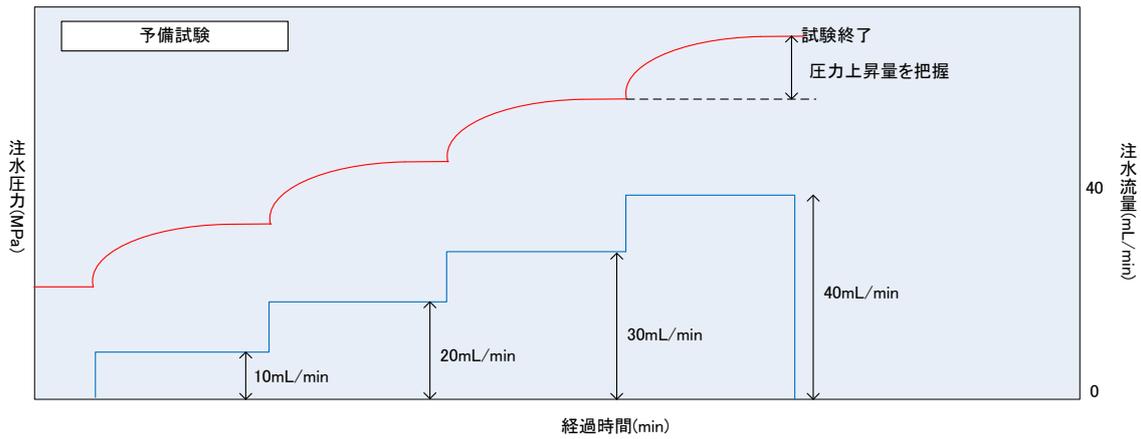


図 4.2.4-27 予備定流量注水試験方法 説明図

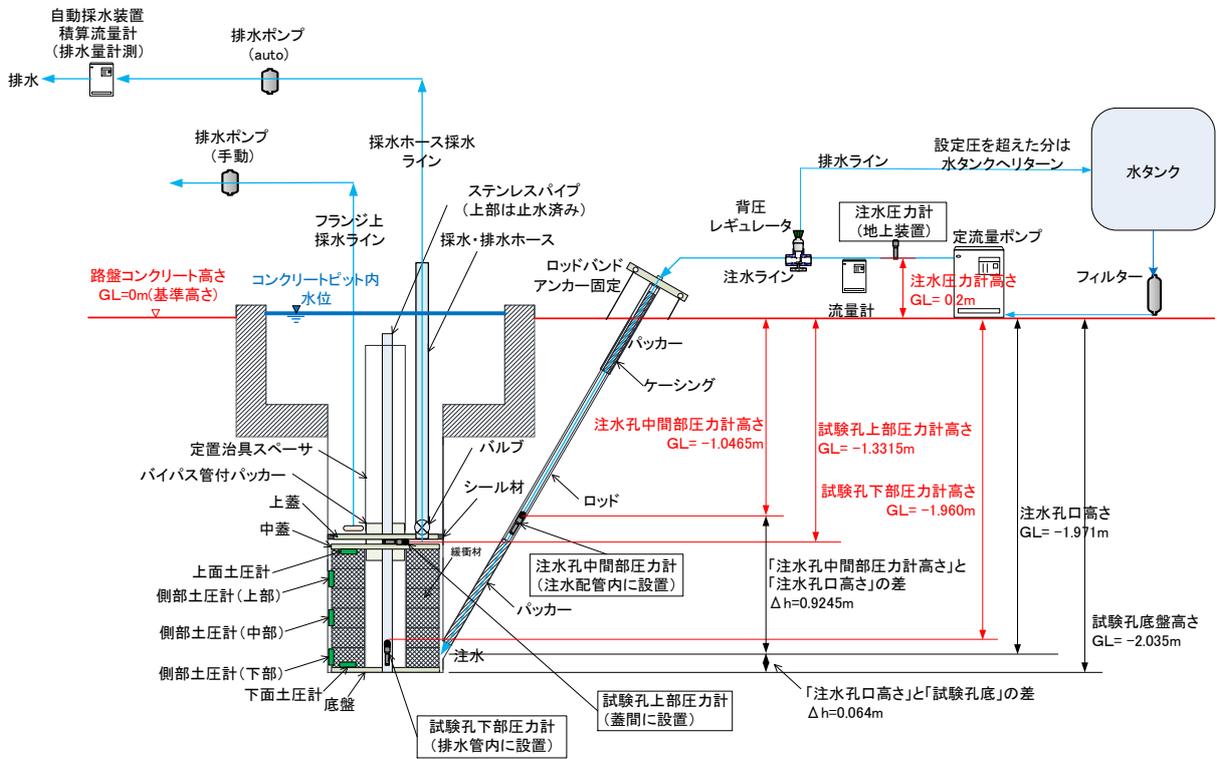


図 4.2.4-28 注水試験装置

(3) 試験結果

1) 流出試験前までの緩衝材の土圧（膨潤圧力）測定

図 4.2.4-29 に緩衝材の膨潤圧測定時の試験装置の模式図を示す。緩衝材の上方への膨潤圧を抑制するための蓋を設置した条件下で、緩衝材を膨潤させるための期間を約 2 ヶ月（1456 時間取り、その期間の土圧（膨潤圧）を測定した。

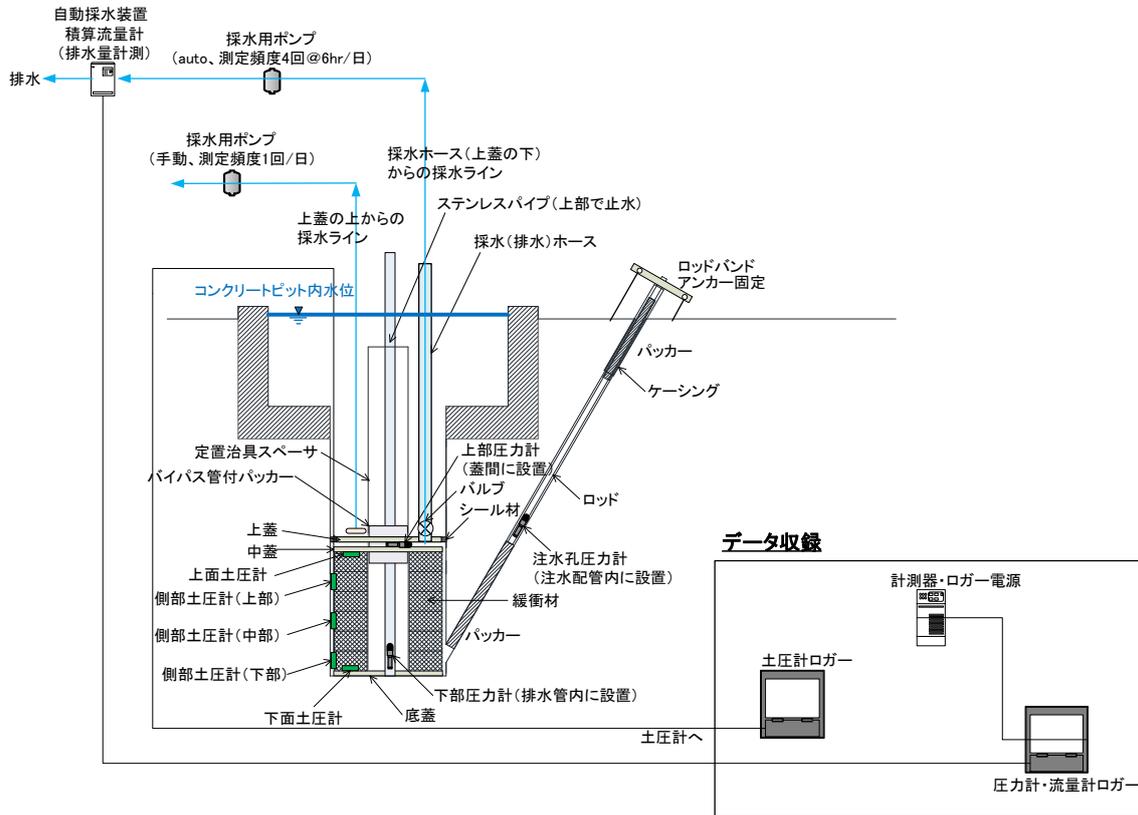


図 4.2.4-29 緩衝材の膨潤圧測定時の試験装置

図 4.2.4-30 に土圧測定の結果を示す。図には試験孔内に設置した下部圧力計（水位計）の測定結果および、採水（排水）ホース内の水位を手計り（図 4.2.4-31：定規を用いて目視測定）した結果を併せて示す。なお、測定結果は、試験坑道 5 の路盤コンクリート高さ（GL）を水位（水頭）0m とし、圧力値を水位（水頭）に換算した。

図 4.2.4-30 の、緩衝材と試験孔壁との間に設置した側部土圧（鉛直設置）の変化傾向に着目すると、上部、中部、下部の順に土圧が発現し、約 2 ヶ月（1456 時間）で上部は 1.09MPa、中部は 1.13MPa、下部は 1.36MPa となったことがわかる。また、側部土圧計の土圧は、約 2 ヶ月の時点でほぼ一定値となり、膨潤が概ね収束したと考えられる。

緩衝材の膨潤状態が、収束状態になったかどうかを把握するため、膨潤理論評価式[21]を用いて検討した。計算には側部の土圧と、緩衝材の膨潤変形に寄与した厚さをパラメータとして使用した。計算結果から、緩衝材と孔壁の隙間が 20mm、膨潤変形に寄与した緩衝材の厚さを 160mm（緩衝材ブロックの幅とほぼ同等）とした場合、下部土圧計で測定された 1.35MPa の土圧は、計算値と同等であった。すなわち、緩衝材全体が径方向に膨潤し安定状態になったことがうかが

える。また中部、上部の土圧計で測定された約 1.0MPa の値についても、緩衝材の浸潤状況から隙間 20mm 程度、膨潤変形に寄与した緩衝材の厚さを 113mm (残りの約 50mm の部分は膨潤していない場合に相当) とした場合に発生した圧力としては、ほぼ安定状態になったと考えられる。

緩衝材の上面 (図中の薄オレンジ線) と下面 (図中の水色線) の土圧 (水平設置) の挙動に着目すると、両者とも 500 時間経過頃より膨潤圧が発現し、1456 時間 (約 2 ヶ月) 後には、上面は 0.55MPa、下面は 0.96MPa となったことがわかる。上下面、および側部の土圧計の設置位置を確認すると、側部土圧計は緩衝材の外周表面 (図 4.2.4-13 参照)、上下の土圧計は緩衝材内部 (緩衝材の外周面から 5cm 程度内部、図 4.2.4-14 参照) に設置された。水の浸潤距離の違いが、膨潤圧の発現に時間差が生じたと考えられる。

なお、試験体設置から 1456 時間 (膨潤圧測定期間) は、コンクリートピット内の湧水 (上蓋の上部孔壁からの湧水) の常時排水は行わず、試験孔内部の水圧は周辺岩盤の間隙水圧とほぼ同等の条件を保つこととして緩衝材を膨潤させ、採水の際のみポンプを使用した。ただし、上蓋の下部の試験孔内の湧水は、連続的に採水した (11~25mL/min)。

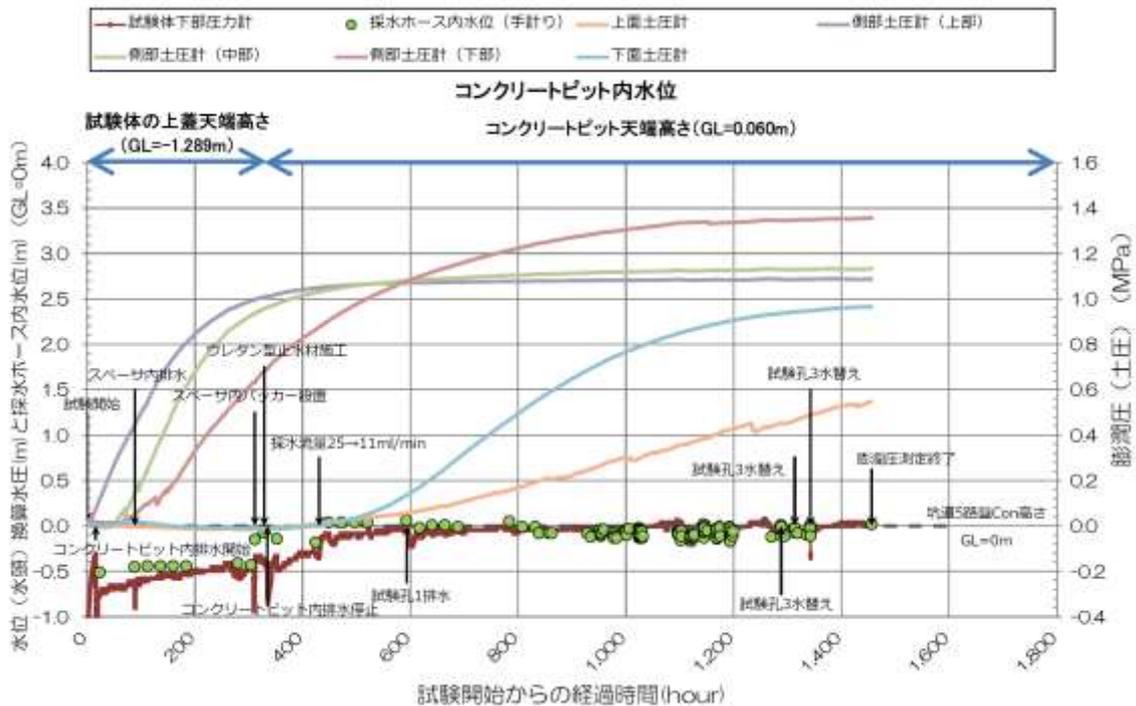


図 4.2.4-30 緩衝材の膨潤圧 (土圧) 測定結果



図 4.2.4-31 採水ホース内の水位状況 (手計り状況)

2) 注水試験結果（予備）

予備注水試験は、10mL/min、20mL/min、30mL/min と段階的に注水流量を増加させ、水圧データを取得した。図 4.2.4-32、図 4.2.4-33 に予備注水試験結果を示す。なお、これらの図の時間 0 は、注水試験を開始した日時である。また、流量を変化させるタイミングは水圧が約 30 分間は安定した後とした。

図 4.2.4-32 の結果に示す通り、注水流量 10mL/min での注水開始とともに注水圧力（注水孔中間部圧力計）は、0.029MPa で安定したことがわかる。次に、注水流量を 20mL/min に変更すると、その直後に注水圧力が急増し最大 0.034MPa となったが、その後、徐々に低下し、注水流量 10mL/min の時よりも高い 0.031MPa で安定した。続いて、注水流量を 30mL/min に増加させると、注水圧力は最大 0.035MPa まで上昇した後、徐々に 0.034MPa 程度まで低下した。ここまでの傾向は 20mL/min の場合と同様であったが、その後、急激に低下し、注水流量 10mL/min の時よりも低い 0.022MPa 程度となった。また、注水流量 30mL/min で注水を続けると、注水圧力は徐々に上昇傾向（0.024MPa と微増）を示した。これより、注水流量が 20mL/min 以上の場合には、緩衝材にパイピングが生じたことが推察される。

図 4.2.4-33 は、各深度に設置した水圧計の値を比較するため、水圧計の測定結果を水位（水頭）に換算して記した。圧力の基準高さを注水孔口高さ（G.L.= -1.971m）とした。また、図には、採水ホースから採取した水のベントナイト濃度（緩衝材濃度）の結果も併せて記載した。なお、各水圧計の設置位置については図 4.2.4-28 に示してあるので、参照されたい。

図 4.2.4-33 より、注水流量を 30mL/min（0.035MPa）に変更した結果、約 10 分後に注水圧力（図中の青線）が急激に低下したことがわかる。一方、試験体上部の圧力（図中のオレンジ線）は、注水圧力（図中の青線）が低下した時間から約 5 分遅れて（注水流量を変更してから約 15 分後）、ゆっくりと上昇した。この注水圧力と試験体上部の圧力変化が生じるまでの時間のずれは、注入した水が注水孔から、緩衝材と孔壁の間隙（または、岩盤中の割れ目）、などの経路を通じ、試験孔上部までのある程度長い距離を連通したためと推定される。また、注水圧力が急激に低下した時間に、採水ホースから取得した採水のベントナイト濃度が急に高い値となったことから、緩衝材の一部が流出する現象が起きたと考えられる。

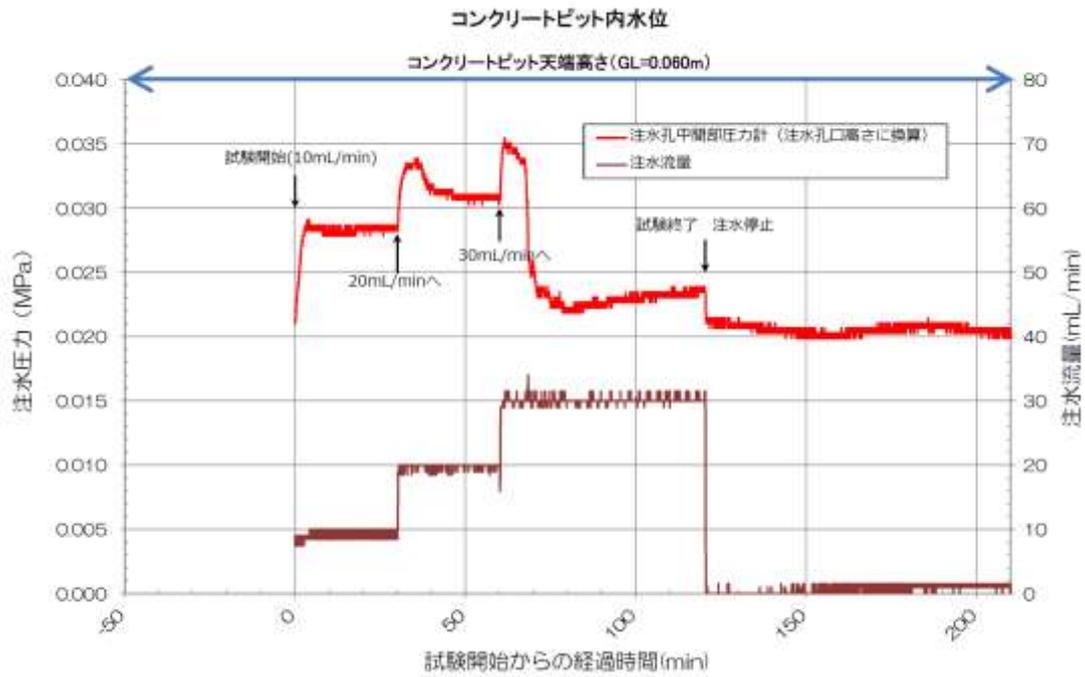


図 4.2.4-32 予備注水試験結果 (1/2)

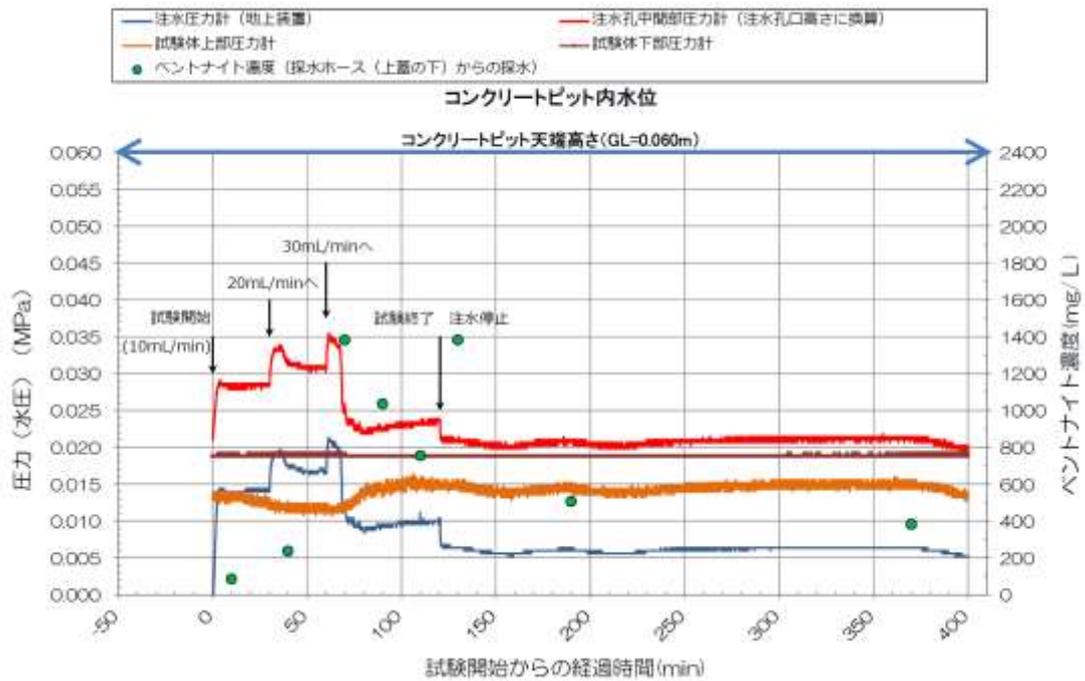


図 4.2.4-33 予備注水試験結果 (2/2)

3) 注水試験結果 (1回目)

本試験(注水試験1回目)では、予備試験と注水の条件を等しくした再現性の確認、およびローダミンを用いた色水注水による緩衝材流出の有無の確認試験を実施した。

図 4.2.4-34、図 4.2.4-35 に注水試験結果(1回目)を示す。

図 4.2.4-34 に示す通り、注水流量を 10mL/min、20mL/min、30mL/min と段階的に上昇させると、注水圧力も呼応して、0.021MPa、0.022MPa、0.024MPa 程度と段階的に上昇したが、その上昇量は予備注水試験と比べてとても小さく、明瞭ではなかったことがわかる。

図 4.2.4-35 において、各位置の水圧(水位換算値)の挙動に着目すると、注水孔の水圧(図中の青線)が注水開始から時間とともに上昇する傾向がみられ、その傾向と同様に、試験体上部水圧(図中のオレンジ線)も上昇したことがわかる。予備試験時の時間のずれはみられなかった。これより、注入した水は、予備注水試験時に連通した既設経路を通ったため、予備試験の場合と異なり、注水孔圧力と試験体上部の圧力が同じ挙動を示したと考えられる。なお、注水孔圧力と試験体上部の圧力が同じ挙動を示すのは、注水を停止した後にも生じていたことがわかる。

また、図 4.2.4-35 より、採水ホースからの採水のベントナイト濃度は、注水流量 20mL/min に変更した際に約 1000mg/L(最大値)まで増加したことがわかる。この時、緩衝材の一部が流出したためと考えられる。一方、最大値となった時期の前後では、ベントナイト濃度は 600mg/L 前後と、比較的に低い値であったことがわかる。これより、パイピング内に一時的に堆積した緩衝材の一部が目詰まりし、注水により、堆積した多量の緩衝材が一気に流出した、一過性の現象と考えられる。なお、パイピングの目詰まりは、予備注水試験後から注水試験の実施期間(約 24 時間)に、緩衝材が自己修復したことによる目詰まり、または緩衝材の浮遊物質による目詰まり、などが考えられる。

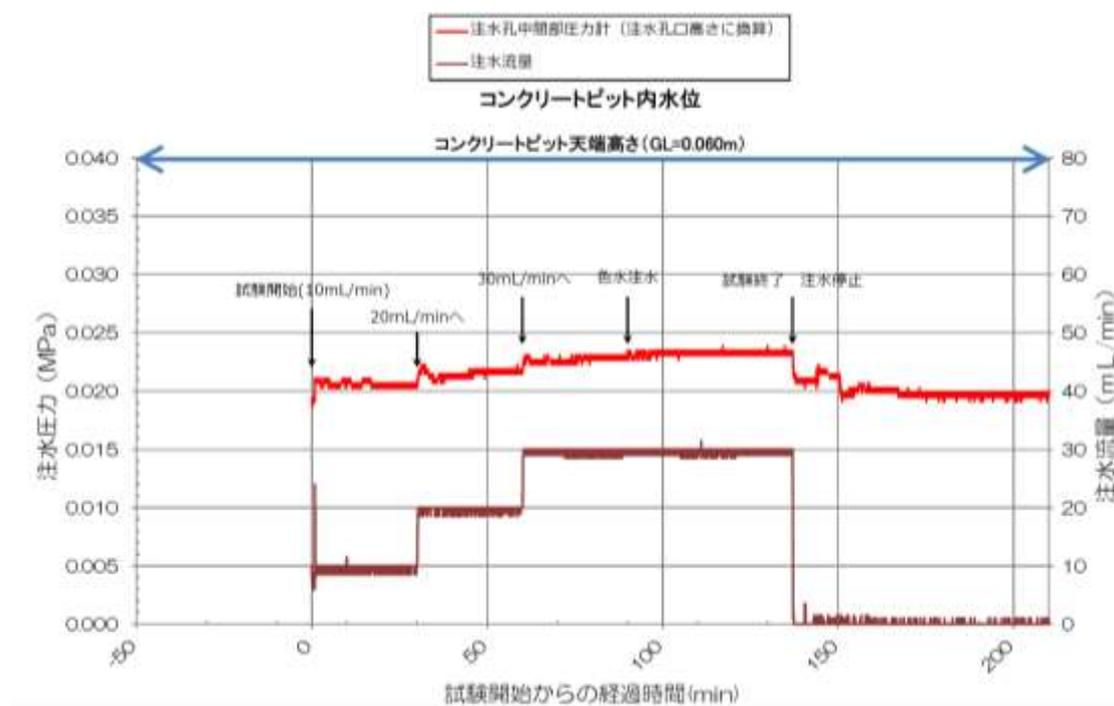


図 4.2.4-34 注水試験結果 (1回目) (1/2)

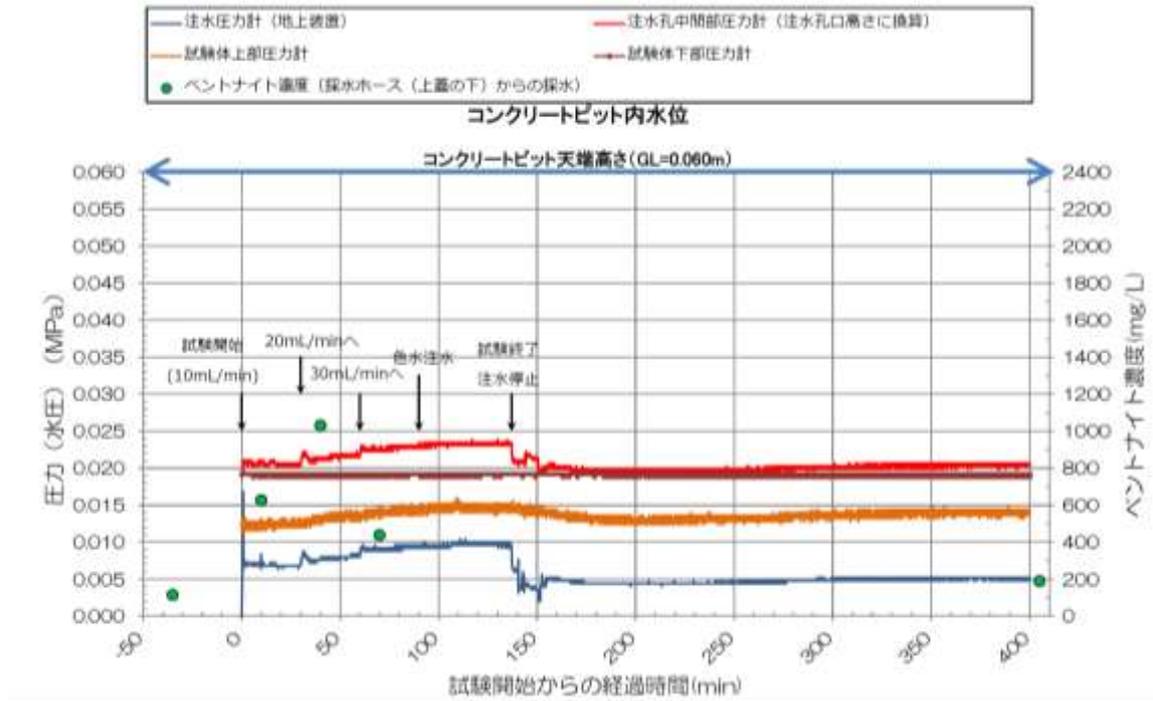


図 4.2.4-35 注水試験結果 (1回目) (2/2)

注水試験（1回目）では、緩衝材の流出する経路（水みち）を確認するため、色水（ローダミンと地下水の混合溶液で、ローダミンの濃度は 5ppm）を注水流量 30mL/min で約 50 分間継続して注水した。色水の注水の際、図 4.2.4-36 に示す試験孔上部の黄色矢印の位置に CCD カメラを設置し、注水孔から注入した色水が試験孔の上部（上蓋と中蓋の間隙）に到達したか否かの観察と、到達した場合にはその到達時間を測定した。

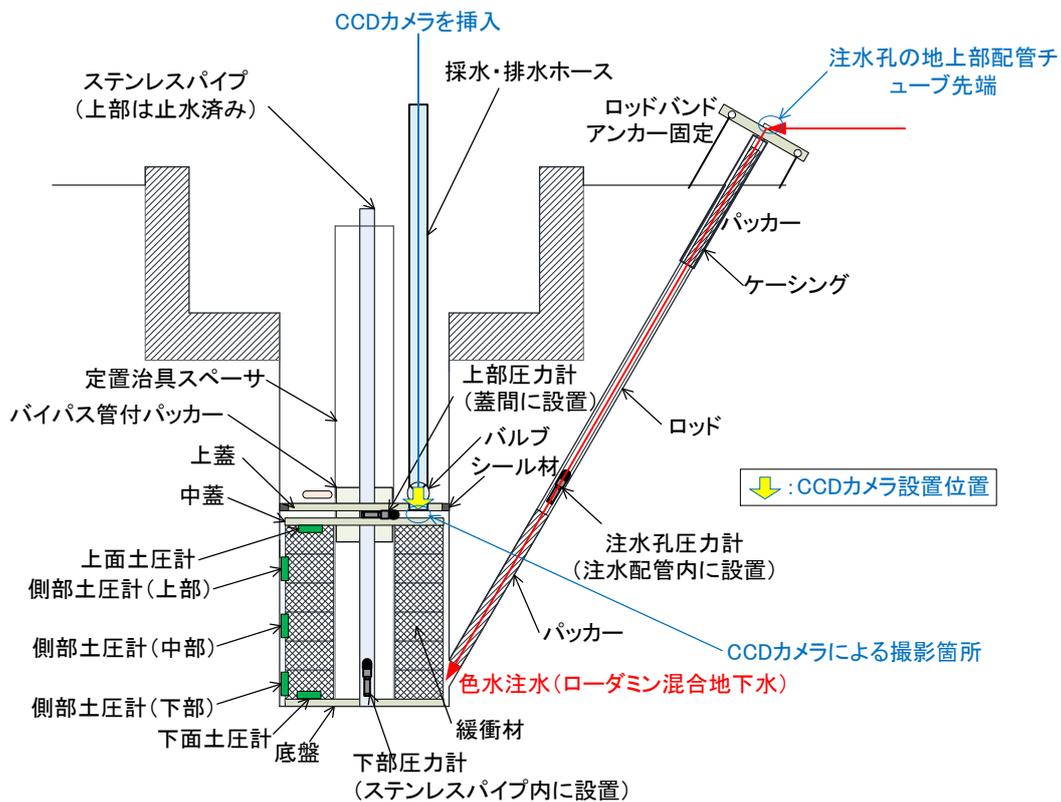


図 4.2.4-36 注水試験時の CCD カメラ設置位置（試験孔上部）

以下に、色水を注入した後の主な経過事項を示す。

- ・ 色水注水開始
- ・ 15 分経過 注水孔の地上部配管チューブ先端までの色水到達を確認（図 4.2.4-37）
- ・ 28 分経過 CCD カメラで試験孔上部までの色水到達を確認
- ・ 30 分経過 色水注水停止、地下水の注水へ切替え
- ・ 47 分経過 地下水の注水を終了

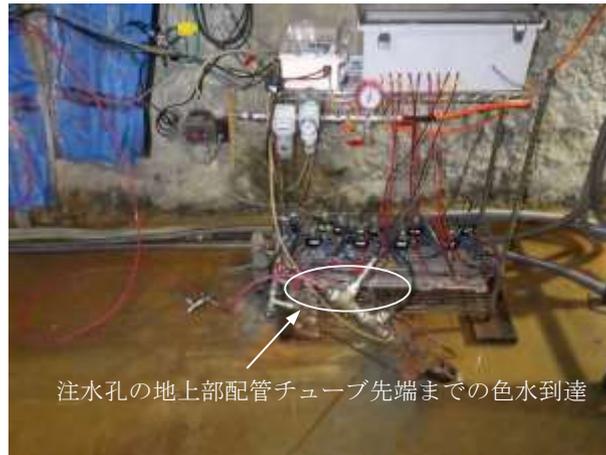


図 4.2.4-37 注水孔の地上部配管チューブ先端までの色水到達

図 4.2.4-38 に、CCD カメラで撮影した試験孔上部の写真を示す。図よりわかるとおり、注水孔から注入した色水が試験孔上部に到達した様子を CCD カメラで確認することができた。注水孔の地上部配管チューブ先端までの色水到達の確認から、CCD カメラで試験孔上部までの色水到達を確認するまでの経過時間は、13 分であった。

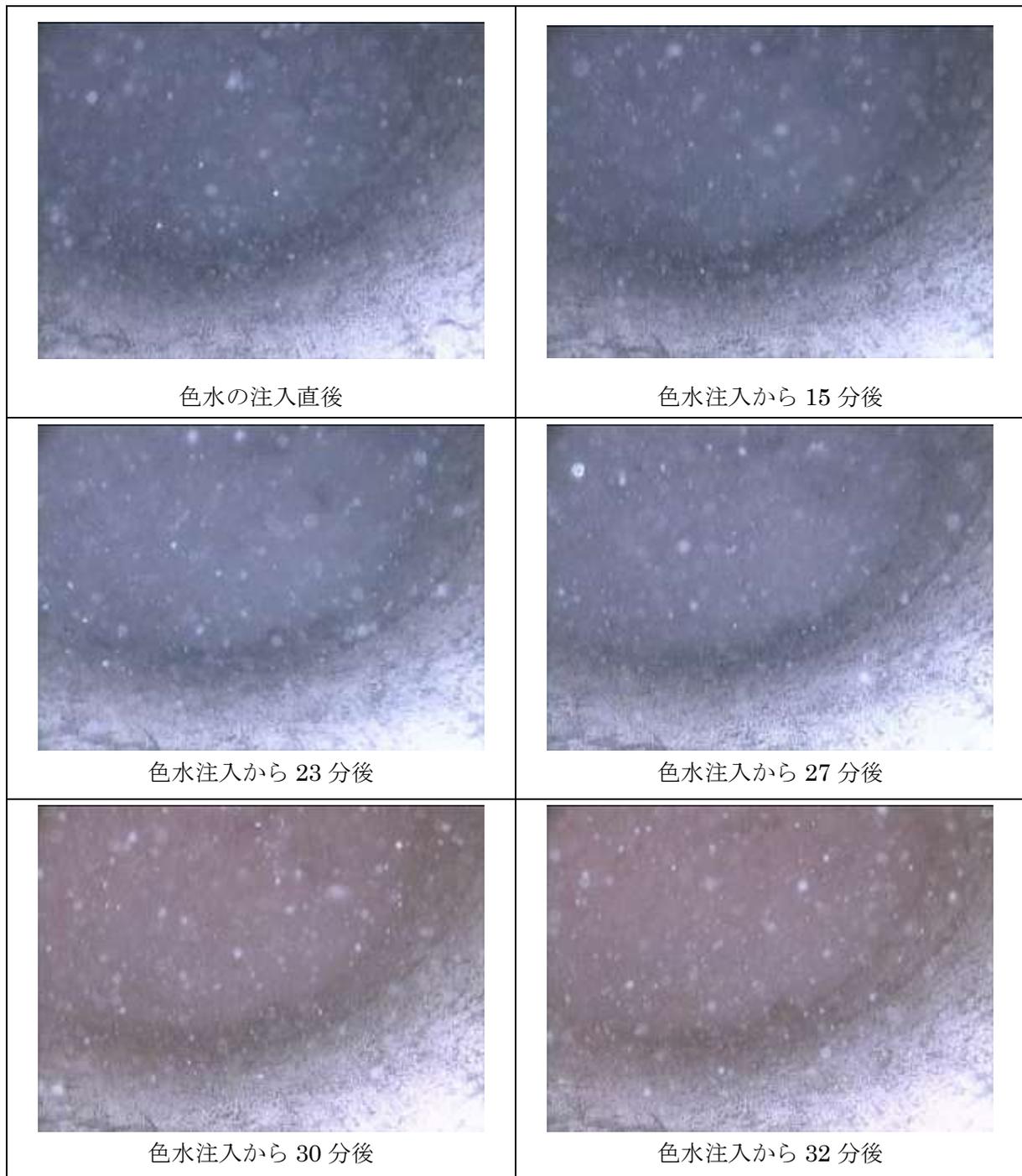


図 4.2.4-38 注水試験（1回目）の CCD カメラによる色水の観察（試験孔上部を撮影）

4) 注水試験結果 (2回目)

注水試験(1回目)の結果より、注水孔付近から試験孔上部までのパイピングについて、その経路を特定することはできなかったが、試験孔内の水が試験体上部まで移動するパイピングの経路の存在自体は確認できた。そのため、本試験(注水試験2回目)では、パイピングの経路を明確にすることを目的として、昨年度の注水条件と同じ注水流量 100mL/min で試験を行った。100mL/min までは段階的に上昇させた後(注水試験2回目)、色水の注入を2回実施した。なお、本注水試験(2回目)では、注水流量を段階的に100mL/min まで上げた後、定流量100mL/min で注水を継続したが、色水を注入した期間は、CCDカメラによる撮影のため、一時的に注水を停止した。

試験結果を、図4.2.4-39と図4.2.4-40に示す。図4.2.4-39より、注水試験(1回目)と同様に、注水流量を100mL/min まで段階的に上昇させると、注水圧力も呼応して、段階的に上昇したことがわかる。また、図4.2.4-40より、各水圧の挙動に着目すると、注水開始より注水孔の圧力(図中の青線)が上昇すると、試験体上部圧力(図中のオレンジ線)も上昇した。この連動した挙動は、注入した水が、予備試験や注水試験(1回目)で既に形成された既設の経路内を通ったためと考えられる。

採水ホース(上蓋の下)からの採水のベントナイト濃度は、図4.2.4-40からわかるように、注水流量を30mL/min に上昇させた際に約600mg/L となったが、注水流量を100L/min とした後に水圧が安定する(試験開始から180分以降)と約200mg/L 程度と低下した。

注水流量を30mL/min に上昇させた際に、約600mg/L と比較的高いベントナイト濃度が測定された理由は、注水試験(1回目)と同様に、注水開始により発生した水の流れにより、パイピング経路内に堆積していた目詰りしていた緩衝材が流出した結果と考えられる。

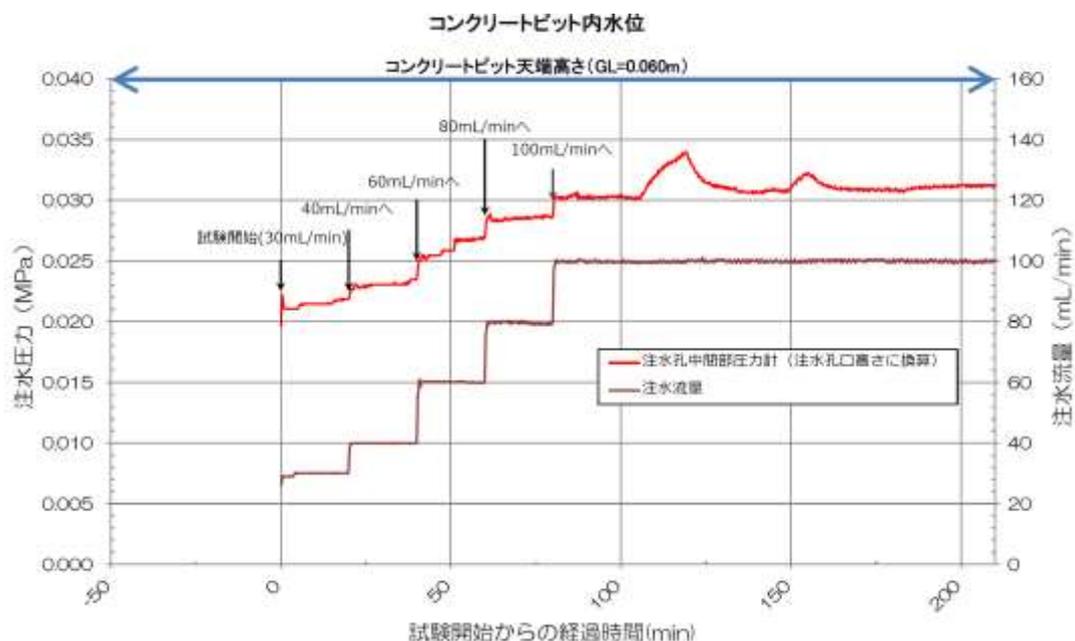


図 4.2.4-39 注水試験結果 (2回目、注水流量上昇時)

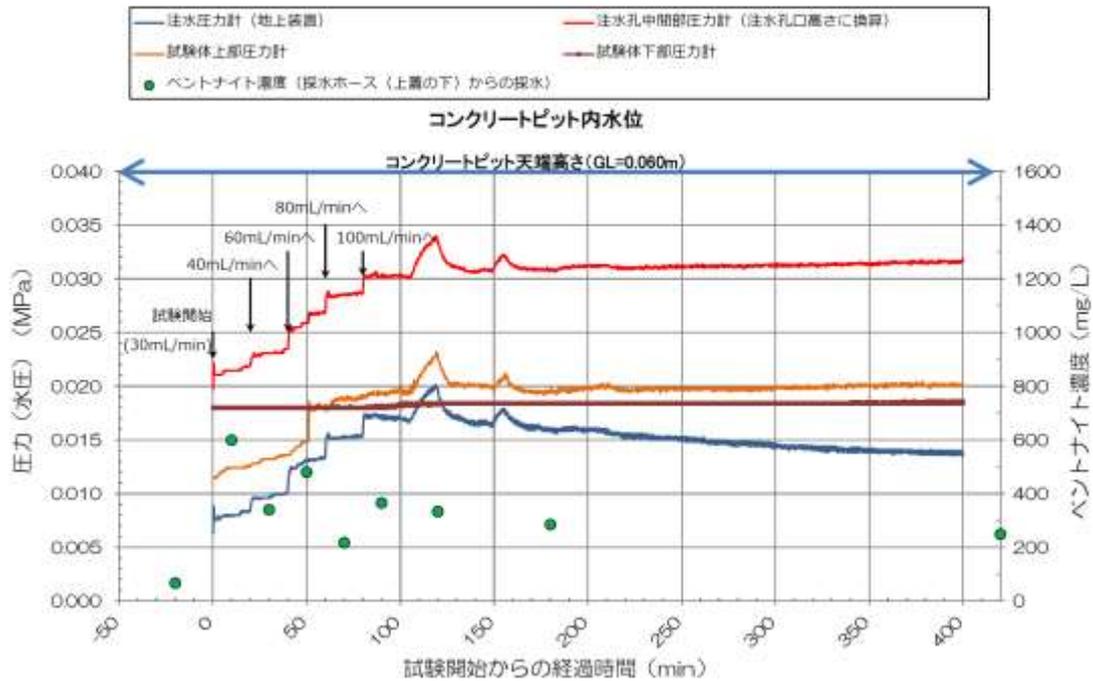


図 4.2.4-40 注水試験結果（2回目、注水流量上昇時）

図 4.2.4-41 から図 4.2.4-43 に注水試験（2回目）の全体結果を示す。

図 4.2.4-41 より、定流量 100mL/min で注水中の注水圧力に着目すると、注水圧力は 0.029MPa から 0.038MPa まで徐々に上昇したことがわかる（図の黄色○部分）。また、図 4.2.4-42 より、注水圧（図中の青線）、注水孔中間部圧力（図中の赤線）、および試験体上部圧力（図中のオレンジ線）は、コンクリートピット内（上蓋の上）に溜まった水を排水した際に一時的に低下したが、緩やかに上昇し 6000 分以降は、概ね一定値となり安定したことがわかる。

採水ホース（上蓋の下）からの採取した採水のベントナイト濃度に着目すると、注水流量を 30mL/min に上昇させた際に、ベントナイト濃度が約 600mg/L と最大となった。一方、さらに多い流量（100mL/min）で注水した試験期間では、試験初期である 1500 分までは、30mL/min の時よりも少ない約 200mg/L であったが、それ以降は、ほぼ 0mg/L となったことがわかる。

図 4.2.4-43 より、緩衝材の外側と孔壁の間に設置した側部土圧計と緩衝材の下面に設置した土圧計の圧力は、どれもほぼ一定の値で安定していることがわかる。しかし、緩衝材の上面に設置した土圧計の圧力は（図中の薄いオレンジ色の線）、約 7000 分（約 5 日、約 117 時間）の期間で 0.57MPa から 0.63MPa までとまだ緩やかに上昇していることがわかる。

色水を注入することによるパイピングの経路の確認試験によれば、今回の試験でも注水孔付近から試験孔上部まで連通する経路（水みち）が存在することが確認できた（詳細は後述）。しかし、注水圧力や試験孔内部の水圧が、徐々に上昇し、ほぼ安定したこと、および、試験体の各箇所の土圧が安定または緩やかな上昇傾向であることから、緩衝材の自己修復機能も発現したとが考えられる。

また、採水ホース（上蓋の下側）からの採水のベントナイト濃度が、200mg/L から 0mg/L と低下したことから、緩衝材の流出が進んだ可能性は低いと考えられる。

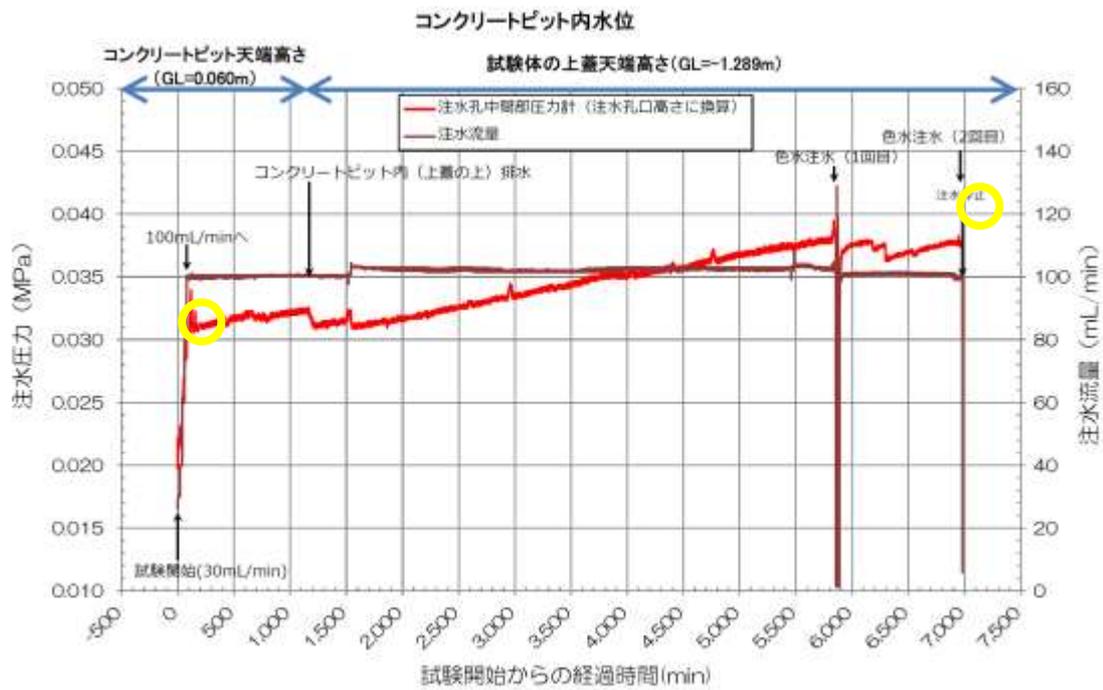


図 4.2.4-41 注水試験結果 (2回目、全体)・注水圧力

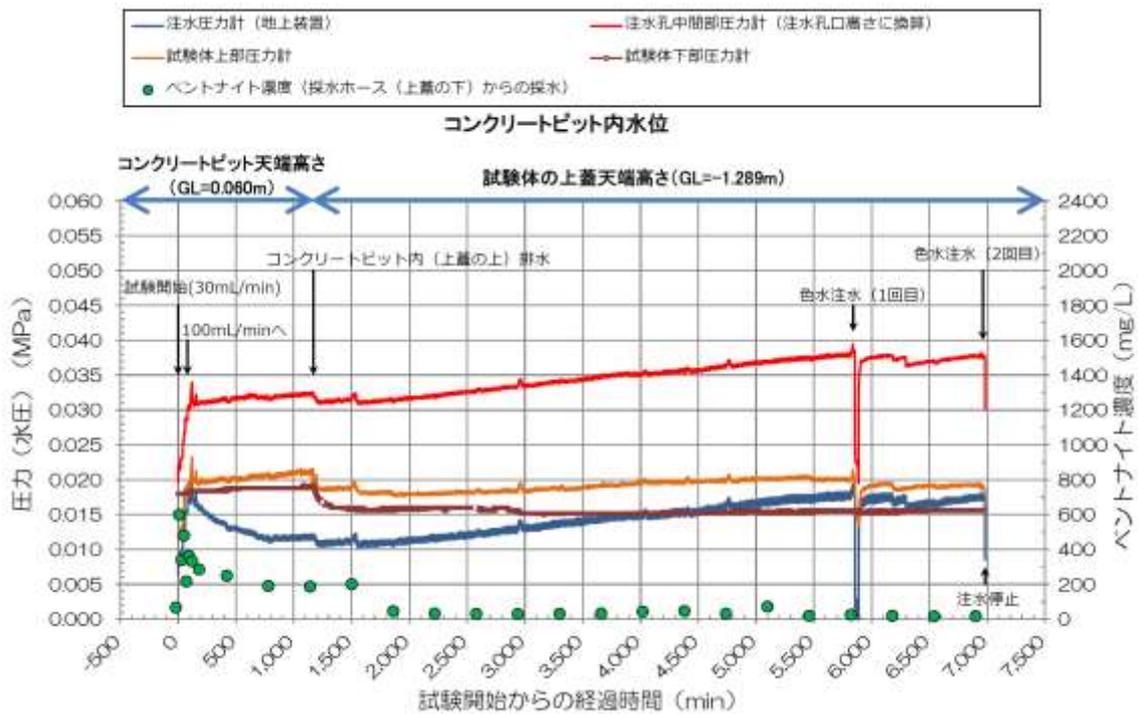


図 4.2.4-42 注水試験結果 (2回目、全体)・水圧とベントナイト濃度



図 4.2.4-43 注水試験結果 (2回目、全体)・水圧と土圧

注入した水のパイピング経路を確認するため、注水流量を 100mL/min に上昇させて 1090 分経過後から、試験孔 3 のコンクリートピット内 (上蓋の上) の水位を制御するため水を排出し、昨年度の試験条件を再現した (図 4.2.4-42 参照)。なお、排水中も、継続して 100mL/min で注水を行った。この状態を 4670 分保持した後、色水 (ローダミンと地下水の混合溶液で、ローダミンの濃度は 5ppm) を、100mL/min で約 15 分間連続して注水した (例えば、図 4.2.4-41 の色水注水 (1 回目))。色水を注水している間、試験孔上部に設置した CCD カメラで撮影した写真を図 4.2.4-44 示す。注水試験 (1 回目) と同様に、注水孔から注入した色水が試験孔上部に到達している様子を CCD カメラで確認することができた。

また、今回は、試験孔上部に色水が到達したことを確認した後、CCD カメラを注水孔内の図 4.2.4-45 の黄色矢印の位置に移動し、注水孔先端部の様子も確認した。その結果を図 4.2.4-46 に示す。

以下に、色水を注水した後の主な経過事項を示す。

- ・色水注水開始 (100mL/min)
(湧水の注水 (100mL/min) 中に、バルブを切替えることにより、色水注水を開始)
- ・3 分後 注水孔の地上部配管チューブ先端までの色水到達を確認
- ・6 分 30 秒後 CCD カメラで試験孔上部までの色水到達を確認
- ・15 分後 色水注水停止 (0mL/min)、CCD カメラの移動 (試験孔上部→注水孔)・撮影
- ・47 分後 地下水の注水を再開 (100mL/min)

今回実施した注水試験（2回目）における色水の注入では、注水孔の地上部配管チューブ先端部（図 4.2.4-45 参照）から試験孔上部に色水が到達するまでの経過時間は、3 分 30 秒であった。注水試験（1回目）における色水注水（30mL/min）での同様の経過時間は、13 分であり、注水流量を 30mL/min から 100mL/min に増加させた事により、色水の試験孔上部までの到達時間が早くなったことがわかった。また、図 4.2.4-48 より、注水孔先端部の CCD カメラによる確認では、色水が試験孔内を流れている様子が確認できた。しかし、試験孔上部までの明確なパイピング経路は確認できなかった。

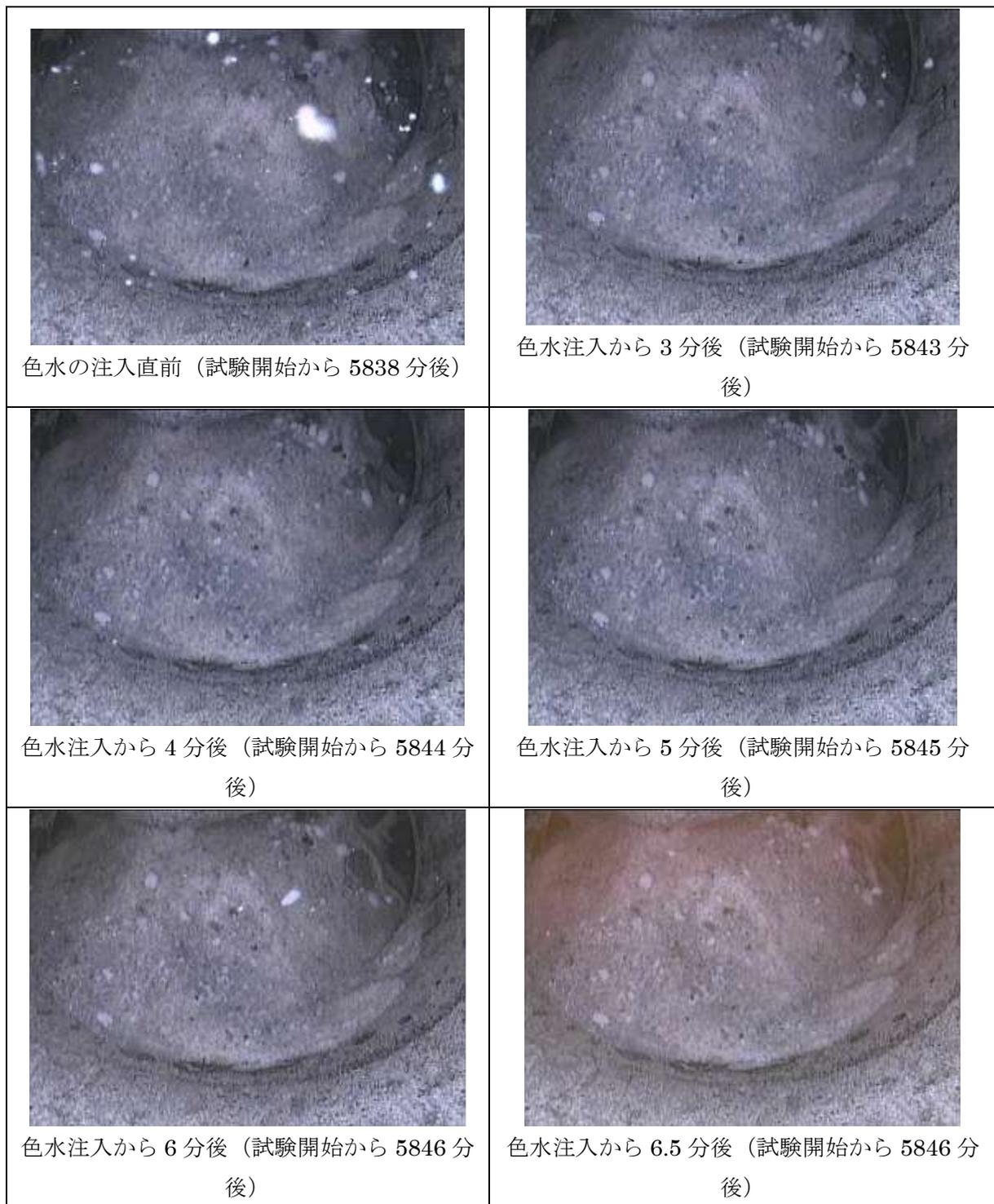


図 4.2.4-44 注水試験（2回目）の CCD カメラによる色水の観察
（試験孔上部を撮影）

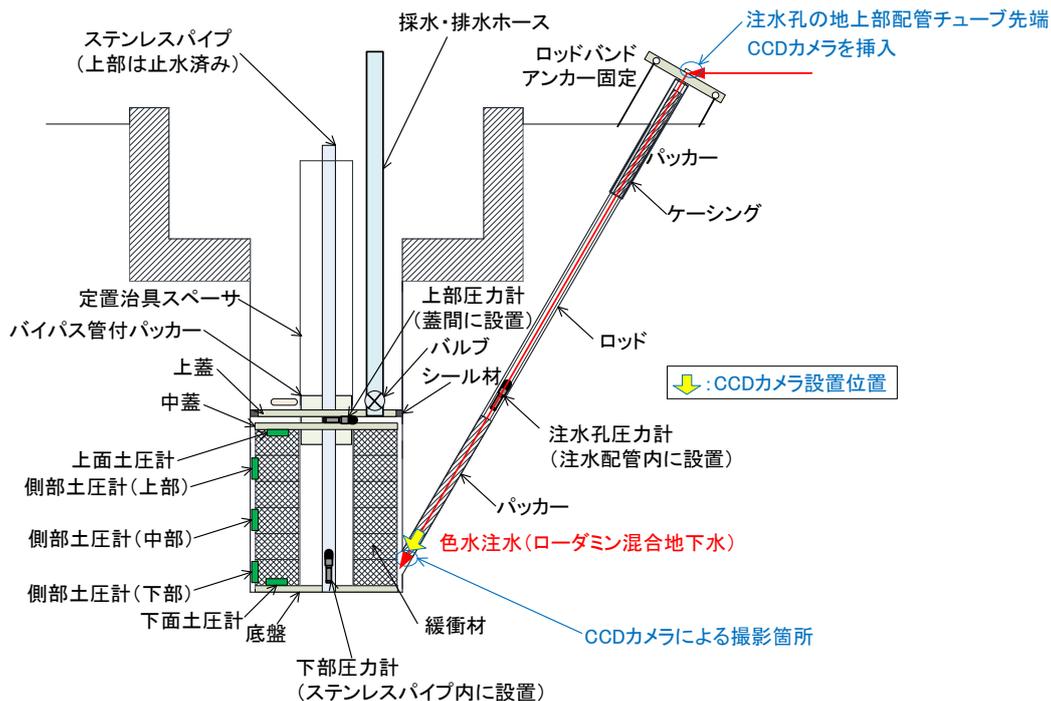


図 4.2.4-45 注水試験時の CCD カメラ設置位置 (注水孔先端部)

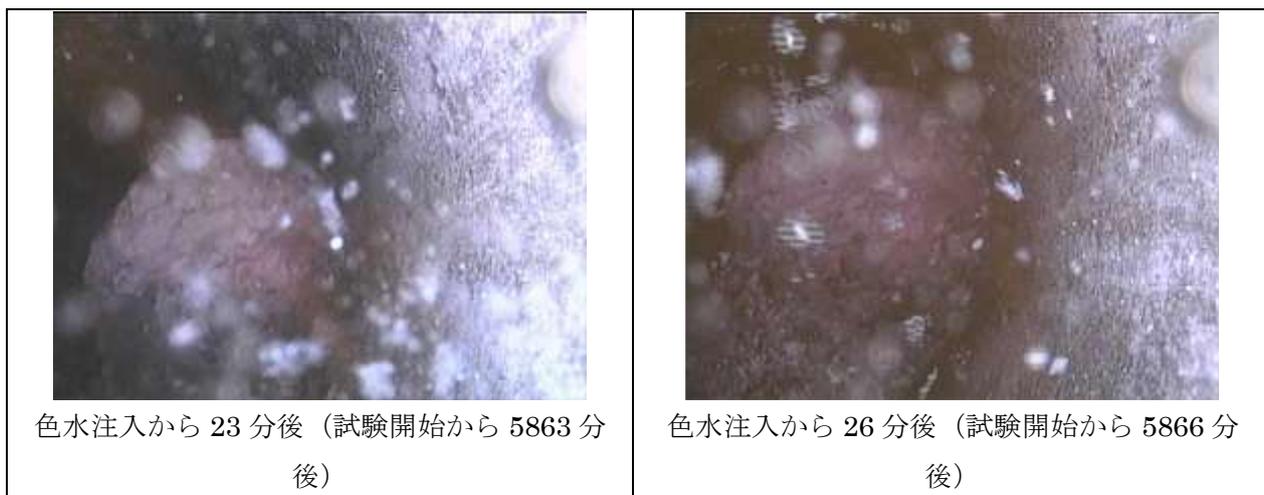


図 4.2.4-46 注水試験 (2 回目) の CCD カメラによる色水の観察 (注水孔先端部を撮影)

1 回目の色水注入後から約 18 時間、100mL/min の定流量で注水を継続した後に色水 (ローダミンと地下水の混合溶液で、ローダミンの濃度は 50ppm) を、再度 100mL/min で約 10 分間、注入した (色水注入 2 回目)。これまでよりも高濃度の色水を注入することで、パイピング経路により多くの色素を付着させ、試験体回収時にその経路が判別しやすくなることを期待した。

以下に、色水を注水した後の主な経過事項を示す。

- ・ 色水注水開始 (100mL/min)

(湧水の注水 (100mL/min) 中に、バルブを切替えることにより、色水注水を開始)

- ・ 3 分後 注水孔の地上部配管チューブ先端までの色水到達を確認
- ・ 6 分後 CCD カメラで試験孔上部までの色水到達を確認
- ・ 10 分後 色水注水停止→湧水の注水 (100mL/min) へ切替え
- ・ 18 分後 注水停止・試験終了→CCD カメラの移動 (試験孔上部→注水孔)・撮影

色水を注水している間、試験孔上部に設置した CCD カメラで撮影した写真を図 4.2.4-47 示す。また、色水の注水を止めた後、CCD カメラを注水孔内に移動させ、注水孔先端部の様子もカメラで確認した (カメラの位置は図 4.2.4-45 参照)。

今回の色水の注入 (2 回目) では、注水孔の地上部配管チューブ先端から試験孔上部までの色水到達の時間は 3 分 30 秒となった。この結果は、1 回目に実施した色水注水時と同じであった。また、注水孔先端部の CCD カメラによる確認でも、1 回目と同様に色水が流れている様子が分かったが、パイピングの経路の特定は困難であった。

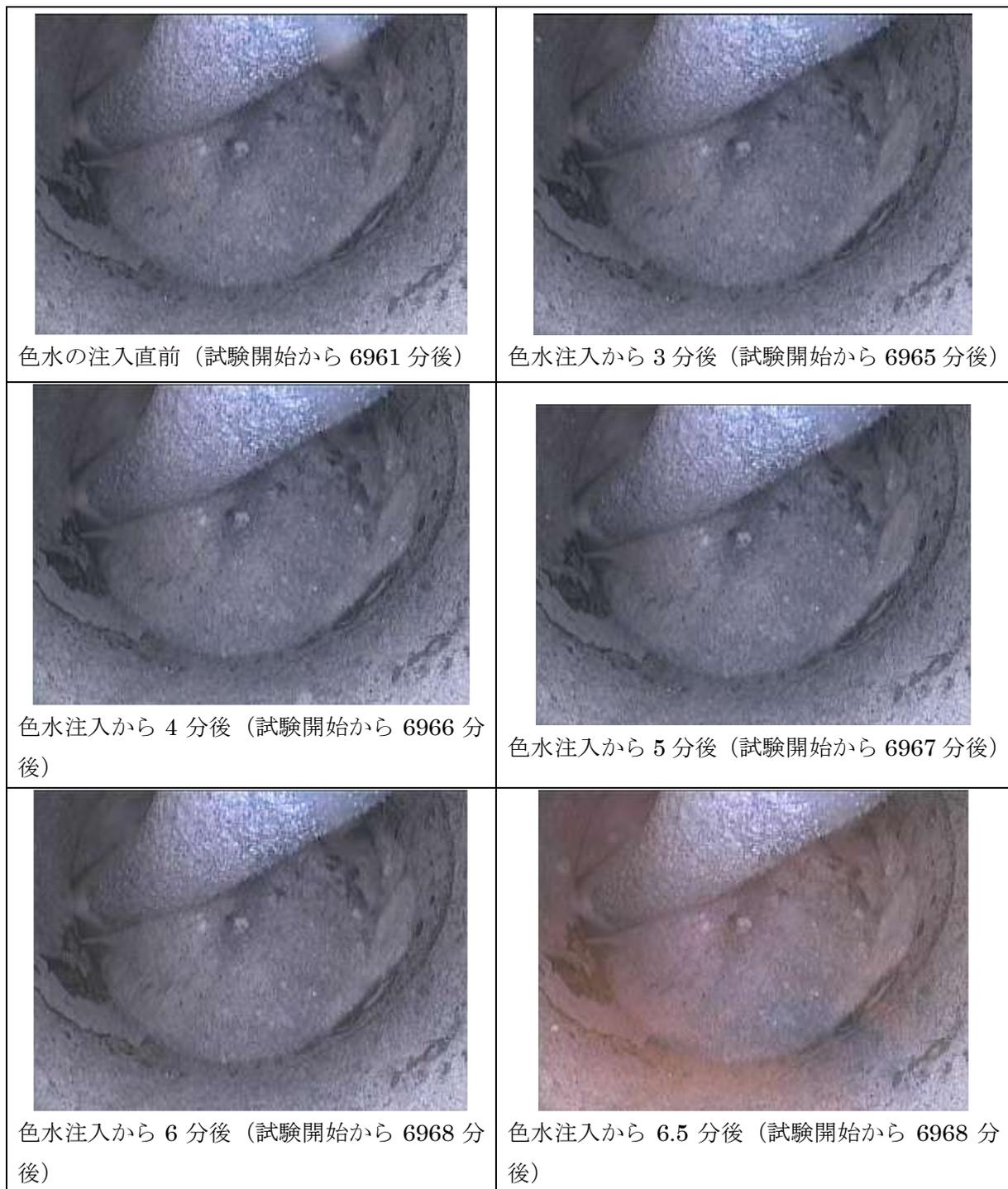


図 4.2.4-47 注水試験（2回目）の CCD カメラによる色水の観察（2回目）
（試験孔上部を撮影）

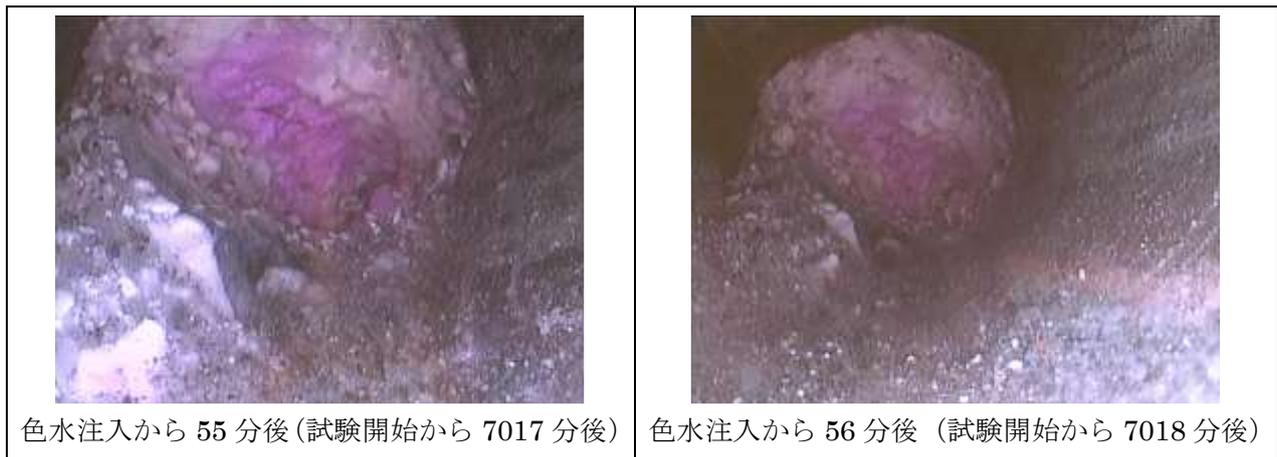


図 4.2.4-48 注水試験 (2 回目) の CCD カメラによる色水の観察 (2 回目)
(注水孔先端部を撮影)

5) 注水試験結果 (3 回目) (定置治具中央部からの注水)

注水試験 3 回目は、試験孔内への注水方法を変更した。注水場所をこれまで注水していた注水孔から定置治具中央部に変更し、図 4.2.4-49 に示すように注水試験を実施した。各圧力計の挙動について、これまでの注水試験結果と比較することにより、注水した水のパイピング経路を推定する一助とする事を目的とした。なお、本注水試験 (注水試験 3 回目) も、注水量を 100mL/min とした。試験結果を図 4.2.4-50～図 4.2.4-52 に示す。

図 4.2.4-51 より、試験孔内への注水場所を変更しても、これまでの注水試験と同様に、注水圧力 (図中の青線) が徐々に上昇すると、注水孔中間部圧力 (図中のオレンジ線) も緩やかに上昇したことがわかる。また、注水を停止した後も、注水孔中間部圧力は、注水圧力の低下から 2 分程度遅れたが、連動するように緩やかに低下した。これより、注水場所を変更しても、注水箇所付近から試験孔上部まで水の通過経路が存在することが推察される。

図 4.2.4-52 から、試験孔のどの位置においても、水圧は試験時間が経過するとともに、わずかではあるが上昇していることがわかる。また、3 か所に設置した側部の土圧はいずれも安定的に 1MPa を超え、上下面の土圧についても、側部土圧よりは小さい値であるが安定していることから、緩衝材の膨潤は、とりあえず収束した状況であると判断できる。しかし、上部については、値が低いことから、まだ膨潤変形が継続する可能性が推定される。

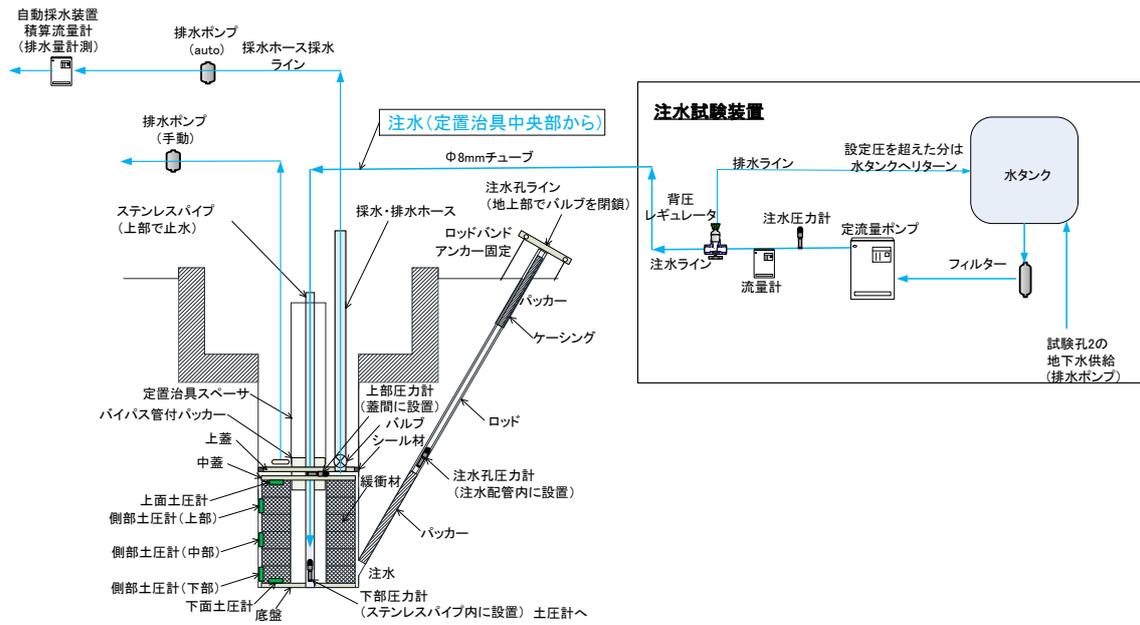


図 4.2.4-49 注水位置

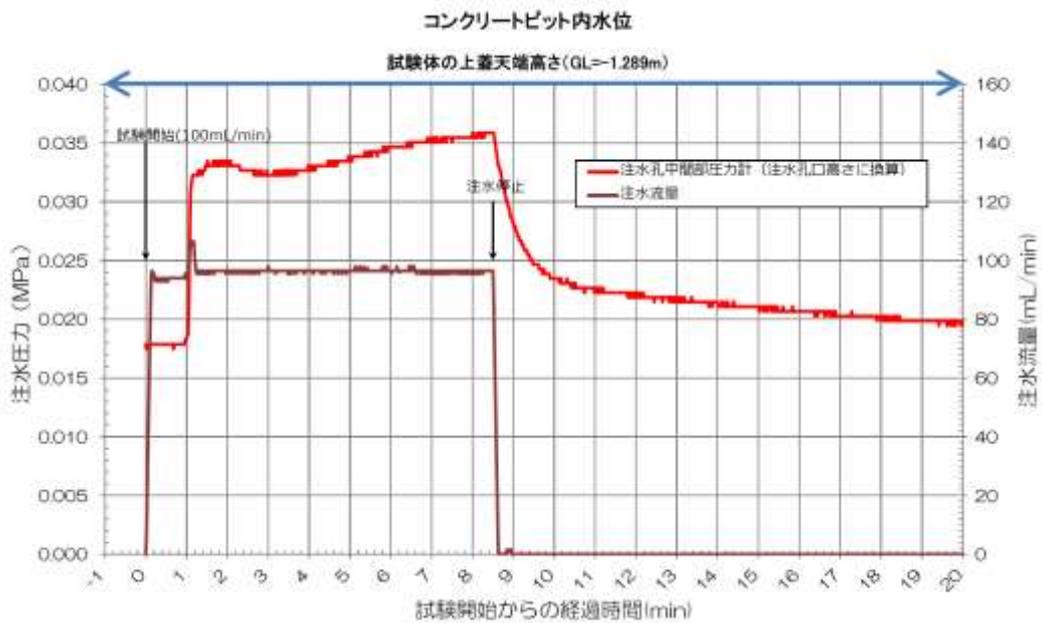


図 4.2.4-50 注水試験結果 (3回目、注水流量上昇時) (1/3)

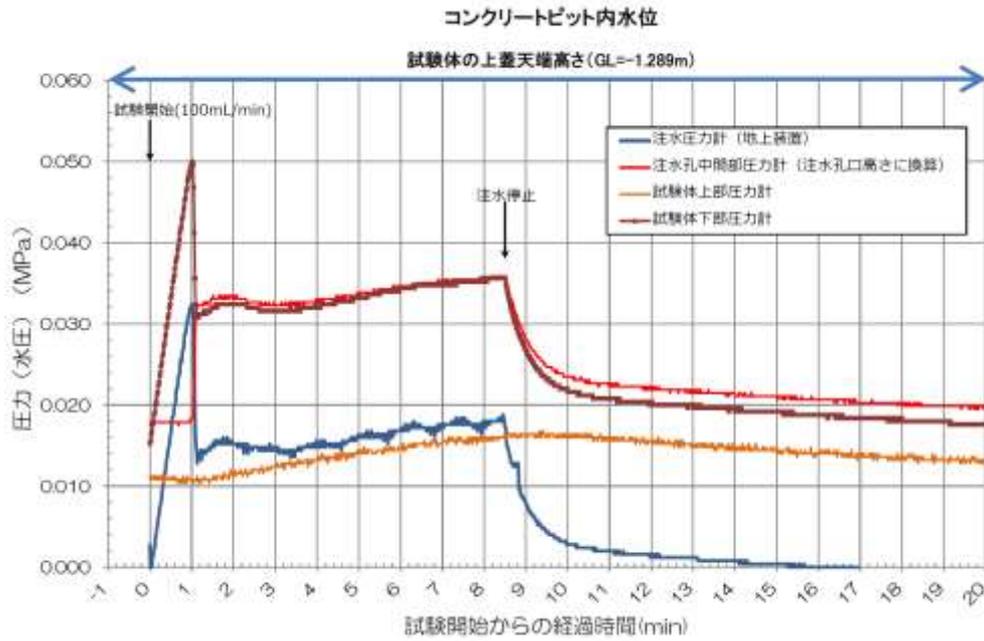


図 4.2.4-51 注水試験結果 (3回目、注水流量上昇時) (2/3)

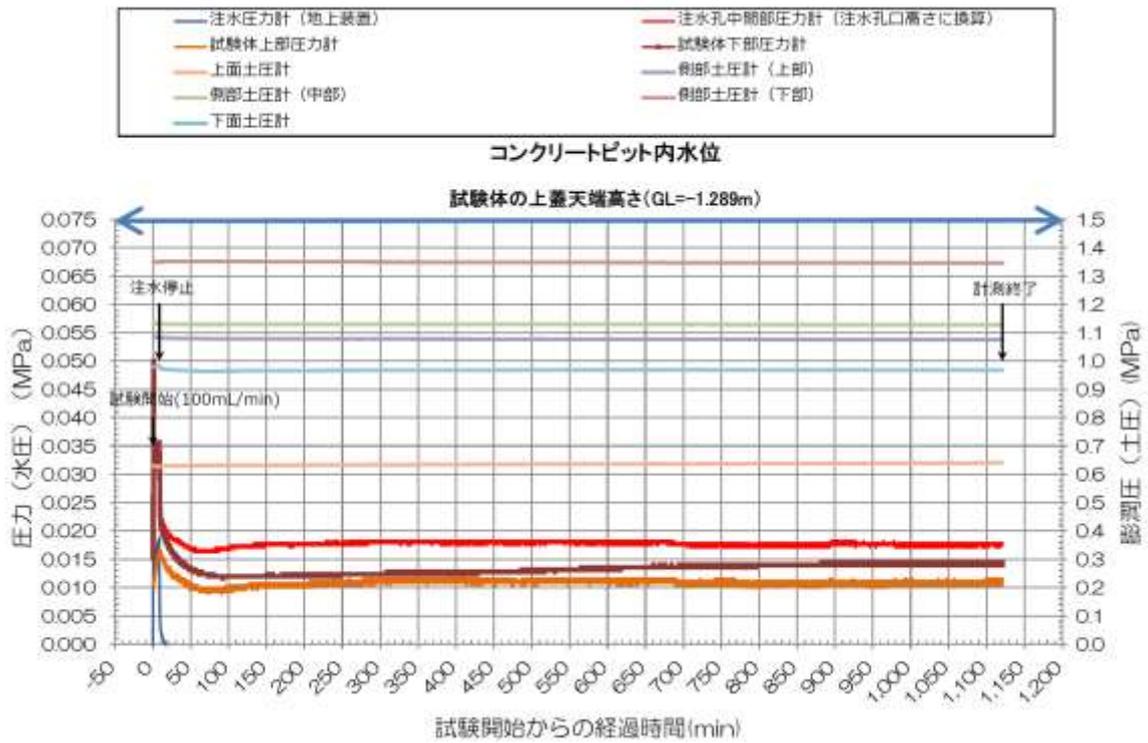


図 4.2.4-52 注水試験結果 (3回目、全体) (3/3)

6) 緩衝材流出量の分析結果

緩衝材の膨潤圧測定期間中（注水試験実施前）における採水試料の吸光度分析結果について、圧力計（水位計）の測定結果（水位（水頭）に換算した圧力）および採水ホース内水位と併記した図を図 4.2.4-53 に示す。なお、水位基準は、試験坑道 5 路盤コンクリート高さである。また、緩衝材の膨潤圧測定期間中における採水試料の吸光度分析結果を、膨潤圧（土圧）測定結果と併記した図を図 4.2.4-54 に示す。

膨潤圧測定期間中の採水は、2 か所で行われた。1 か所は、試験体のエロージョンの発生の有無を推定するための採水ホースからの採水（上蓋より下からの水）で、自動採水とし、測定頻度 4 回/日）とした。2 か所目は、試験体上部への湧水の回り込みの確認や採水ホースからの採水との比較をするための上蓋の上からの採水で、手動採水とし、測定頻度 1 回/日とした。採水に関する説明図を図 4.2.4-55 に示す。また、採水ホース（自動採水装置）からの採水ボトルへの採水および、採取試料（採水ボトル）の写真を図 4.2.4-56 に示した。

図 4.2.4-53、図 4.2.4-54 に示す通り、採水ホースからの採水試料について、試験開始初期の 350 時間までのベントナイト濃度が、その他の期間に比べ比較的高い結果となったことがわかる。さらに、膨潤圧測定期間のうちの最も高いベントナイト濃度として、経過時間 184 時間に約 800 mg/L を測定した。その後、経過時間 604 時間に約 266 g/L、1108 時間に約 360 mg/L、1216 時間に 680 mg/L と不定期に、ベントナイト濃度が急激に上がる結果を得た。

一方、上蓋の上からの採水試料については、試験開始から終了まで、急激な濃度の変化はみられず、比較的安定したベントナイト濃度（5～112 mg/L）であり、採水ホースからの採水試料のベントナイト濃度（急増した際の値は除く）と同程度の値となった。しかし、採水ホースからの採水試料のベントナイト濃度が急激に上がった際については、蓋の上と下で連動した結果は得られなかった。このことから、膨潤圧測定期間中については、緩衝材のパイピング・エロージョンによる、試験孔下部から上蓋の上への緩衝材の回り込み（蓋と孔壁のシール部や岩盤中の割れ目を通じた回り込み）は、少なかったと考えられる。

採水ホースからの採水試料について、試験開始から 350 時間までのベントナイト濃度が比較的高い結果となった理由として、この期間に定置治具スペーサ内のパッカー設置や、上蓋上部のウレタン型止水材の施工などに伴い、コンクリートピット内の排水を実施しており水の流れを発生させている事、および側部土圧計の膨潤圧が上昇している初期の期間であることから、緩衝材の膨潤部分の側部・端部の破片が水の流れにより流され易い状況であった可能性が考えられる。また、採水ホースからの採水試料について、経過時間 604 時間にベントナイト濃度が突出した理由として、経過時間 1108 時間に約 360 mg/L、1216 時間に 680 mg/L と不定期にベントナイト濃度が急増した事象があることから、試験孔下部（上蓋の下）で、湧水中のガス発生や緩衝材の膨潤変形により、緩衝材の一部が流出した可能性がある。しかしながら、継続したベントナイト濃度の上昇はないため、不定期に生じるエロージョン現象で、常時継続することはないと考えられる。

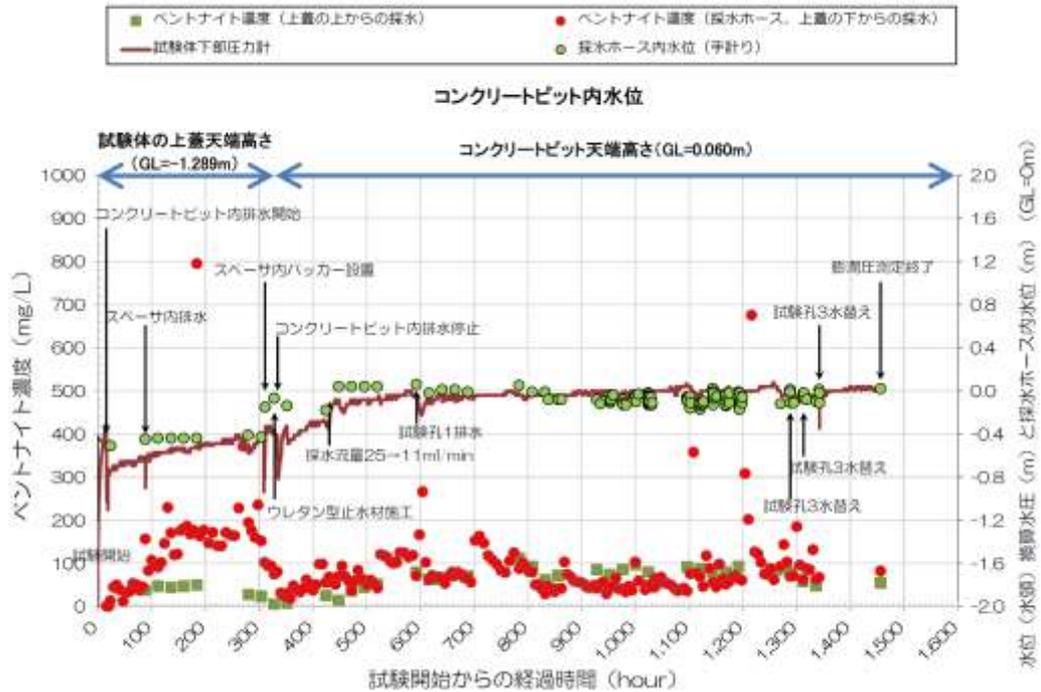


図 4.2.4-53 膨潤圧測定期間中の採水試料の吸光度分析結果 (1/2)

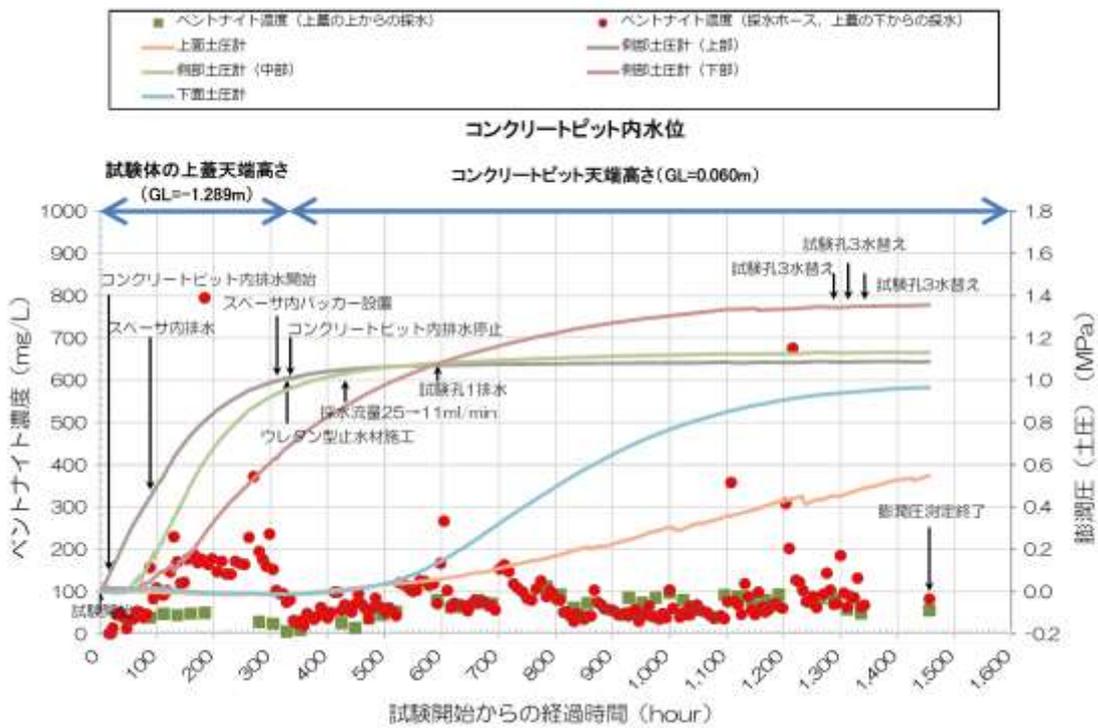


図 4.2.4-54 膨潤圧測定期間中の採水試料の吸光度分析結果 (2/2)

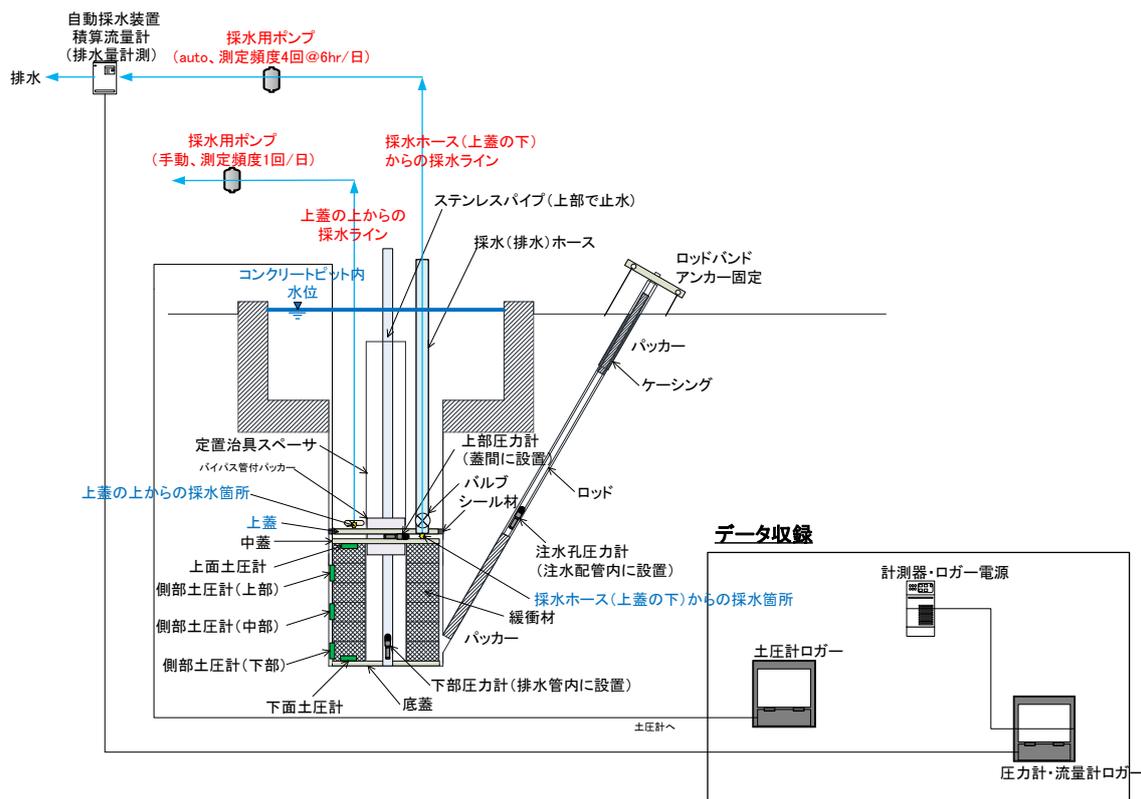


図 4.2.4-55 膨潤圧測定時の採水に関する説明図



(a) 採水ホース (自動採水装置)



(b) 採水試料 (採水ボトル)

図 4.2.4-56 採水

4.2.5 試験体の回収

(1) 解体手順

3回の注水試験の後、緩衝材の密度測定、含水比測定用サンプル取得のため、定置治具にのせたまま試験体を引き上げて回収した。まず、試験体の上蓋と孔壁間およびその上部に実施した止水材（水膨潤性ゴム、一液性水膨潤弾性シール材、ウレタン型の一液型止水材）の撤去を手作業により行った。その後、油圧ジャッキ2台を用いて、緩衝材と孔壁との縁切りを行った。縁切り後、吊具に取り付けたスケールの表示が2t未満（吊り具等の強度上の制限のため）となるように確

認しながら、チェーンブロックによる試験体の引き上げ、回収した。

(2) 試験体の外観、および孔壁の確認

試験体を回収する直前の試験孔の状況を図 4.2.5-1 に示す。図 4.2.5-1 からわかるように、湧水が黒く濁っていた。この黒色の生成物は幌延 URL 内の至る場所で確認されているが、幌延 URL で別途実施されている水理試験等の実施に際して、目立った影響を及ぼしているという報告はない。そのため、この黒色生成物の成分は現状では不明であるが、緩衝材流出試験への影響はないと判断し、試験を実施、継続した。

回収直後の緩衝材の外観を図 4.2.5-2～図 4.2.5-5 に示す。各図からわかるように、表面には上記の黒い生成物の付着がみられた。また、注水孔がある東面に、ローダミンと推察される赤い着色が見られた（図 4.2.5-2 の黄色楕円内）。その他の面には、赤い着色は見られなかった。そのため、東面の緩衝材の表面を詳しく観察した。その結果を図 4.2.5-6～図 4.2.5-9 に示す。

東面の緩衝材表面には、すじ状の跡およびその上部が逆三角形の形で表面が削られていた。この跡および、表面の三角形の削れは、止水材として設置した水膨潤性ゴムの一部を撤去する際、緩衝材表面をこすったために生じたものである（図 4.2.5-6～図 4.2.5-9 の青色枠内）。このゴムによる擦過痕、および三角形の削れ部の南側（図 4.2.5-6～図 4.2.5-9 の左側、黄色枠内）の緩衝材表面には、赤い着色がわずかに残り、またベントナイトの微粒子分が流された形跡がある部分に珪砂の凹凸が見られた。この表面状況は、注水試験により、緩衝材の表面の一部が流出した可能性がある箇所であると考えられる。



図 4.2.5-1 回収直前の試験孔 3 の状況



図 4.2.5-2 試験体回収時の緩衝材の外観（東面：注水孔側の面）



図 4.2.5-3 試験体回収時の緩衝材の外観（北面）



図 4.2.5-4 試験体回収時の緩衝材の外観（西面）



図 4.2.5-5 試験体回収時の緩衝材の外観（南面：側部土圧計設置側の面）

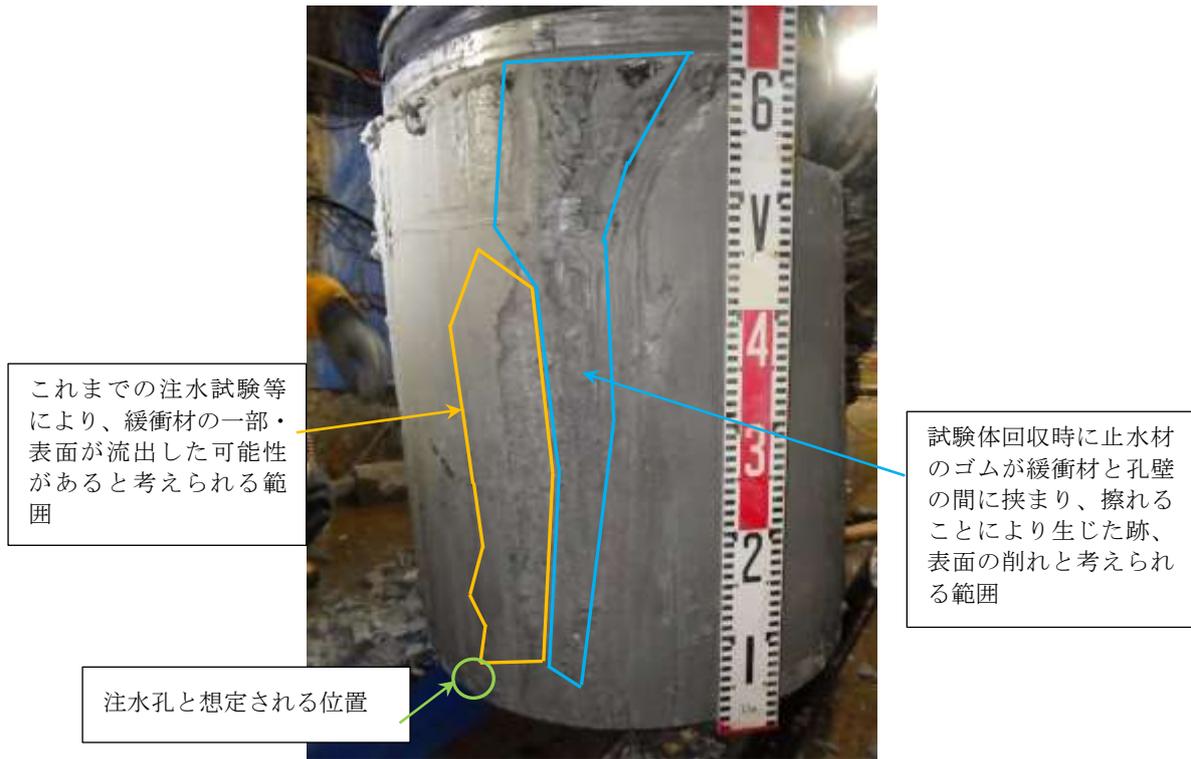


図 4.2.5-6 緩衝材の色水跡状況（東面：注水孔側）

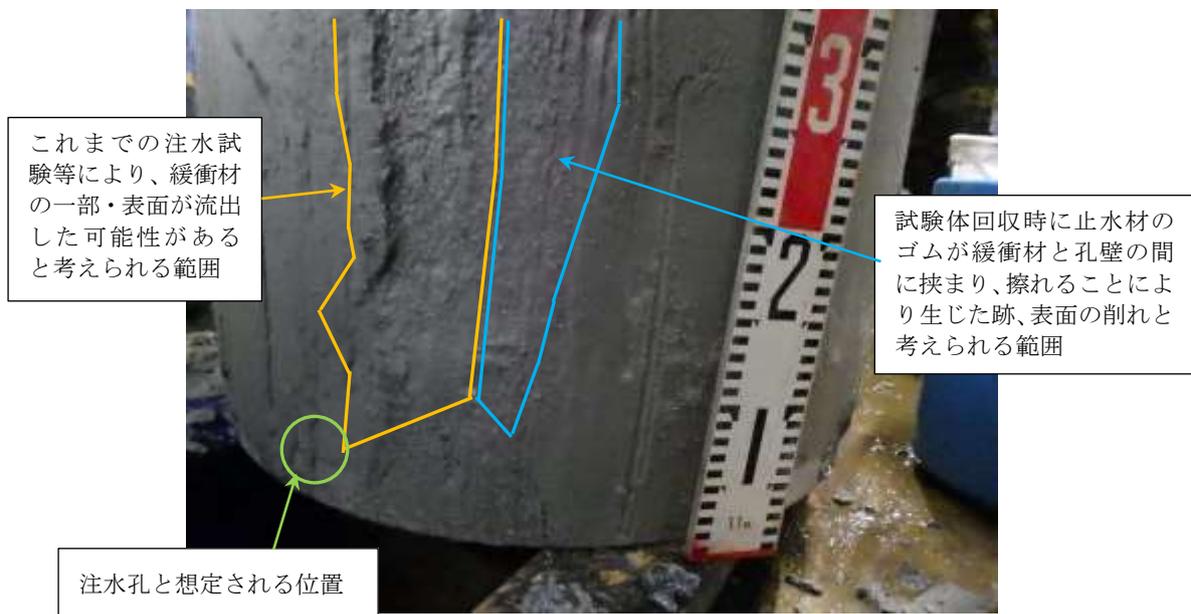


図 4.2.5-7 緩衝材の色水跡状況（色水跡部、東面：注水孔側）

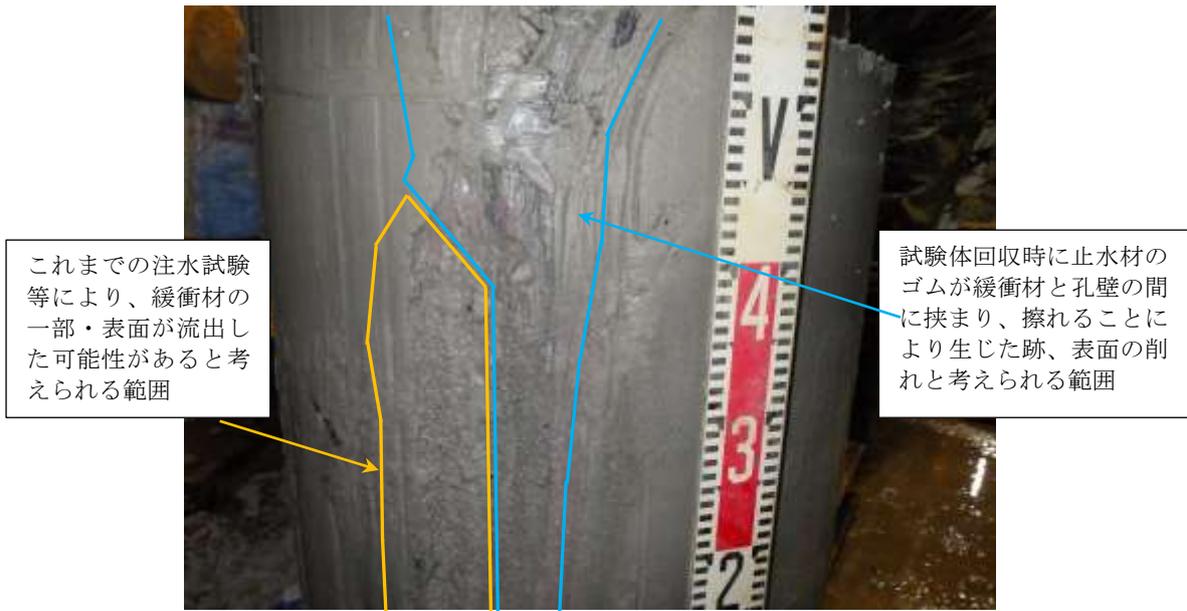


図 4.2.5-8 緩衝材の色水跡状況（色水跡部、東面：注水孔側）

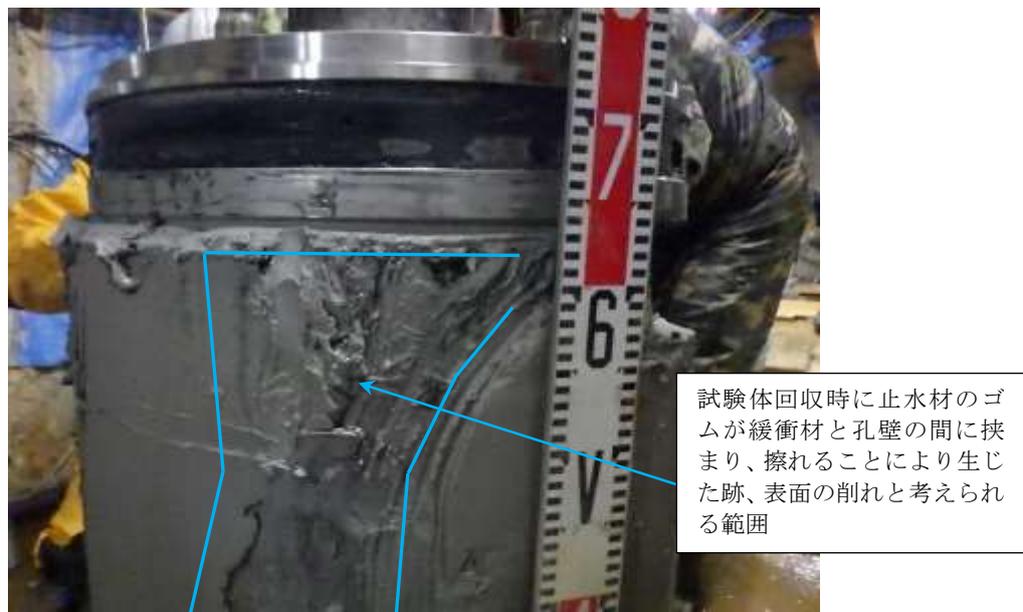


図 4.2.5-9 緩衝材の色水跡状況（色水跡部、東面：注水孔側）

試験体を回収した後の試験孔壁面の外観を図 4.2.5-10～図 4.2.5-16 に示す。なお、図 4.2.5-10～図 4.2.5-13 には、各試験が孔壁に与えた影響を確認するため、同じ部分を対象に試験体を設置する前、試験体回収直後および、試験体回収後の水理試験実施直後の写真を並べて示した。また、図 4.2.5-14～図 4.2.5-16 は、同時期の試験孔壁全体を確認するため、試験孔の展開写真を示した。

図 4.2.5-11 の写真の黄色枠内から、東面における注水孔の上部、すなわち孔底～約 60cm の範囲（緩衝材ブロック設置高さの範囲）に赤色の色水の痕跡が見られることがわかる。これより、注水試験において、東面の注水孔上部の緩衝材は、その表面の一部が試験体上部へ流出したと考えられる。流出の経路については、緩衝材外周表面と試験孔壁の境界面、または周辺岩盤の割れ目などが考えられる。

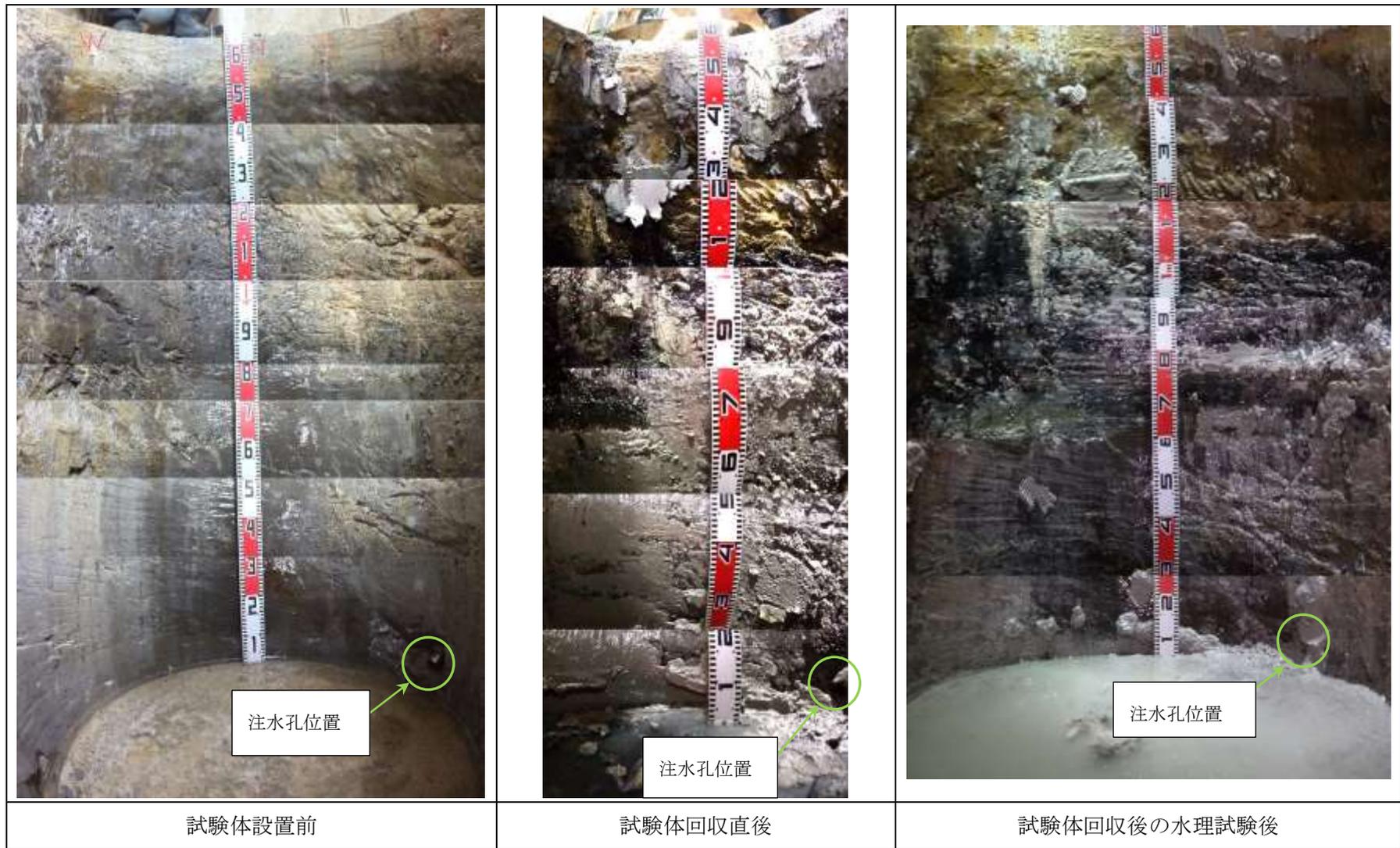


図 4.2.5-10 試験孔壁面写真（北側） 写真の方位：西（左）←北（正面）→東（右）

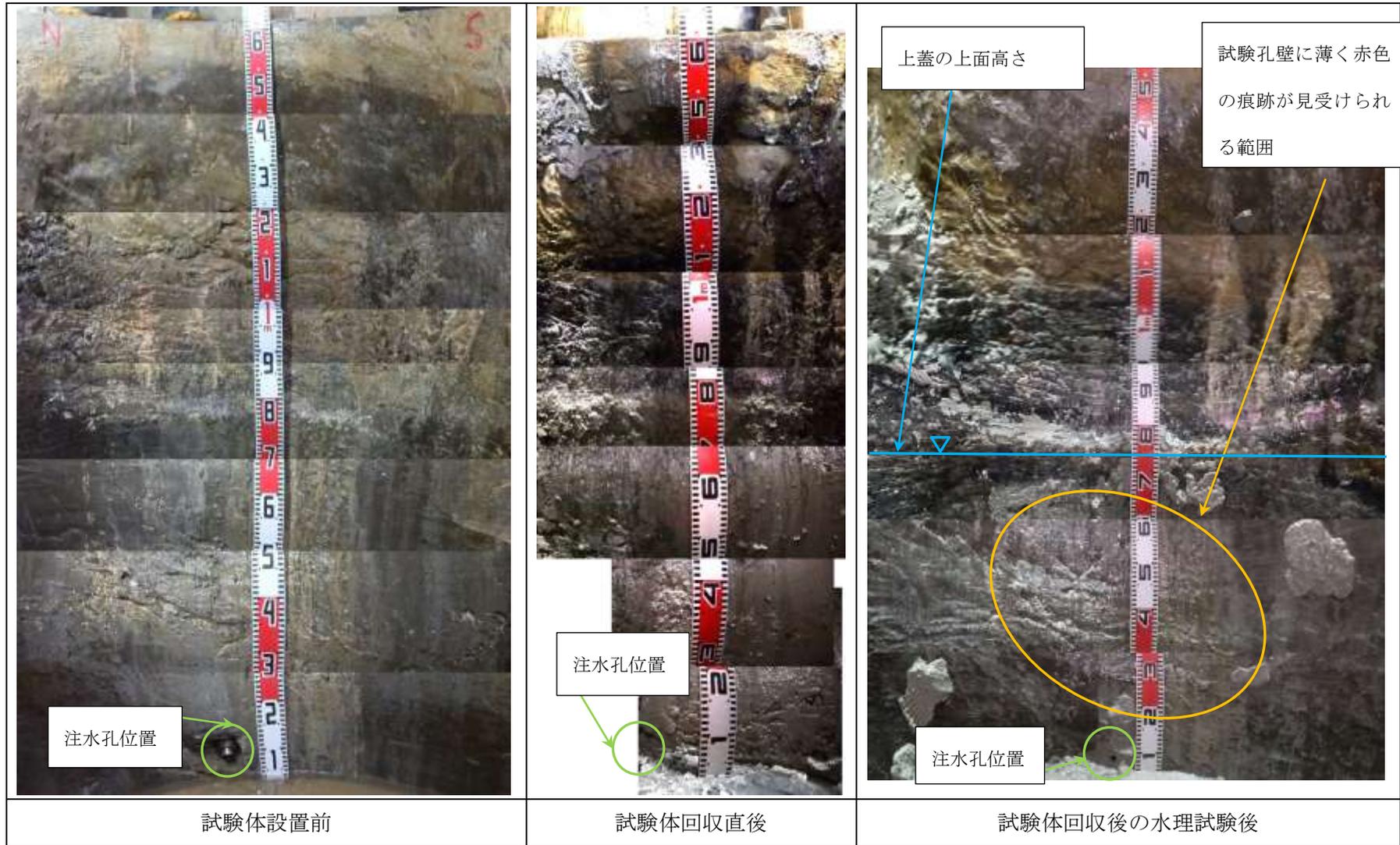


図 4.2.5-11 試験孔壁面写真（東側） 写真の方位：北（左）←東（正面）→南（右）

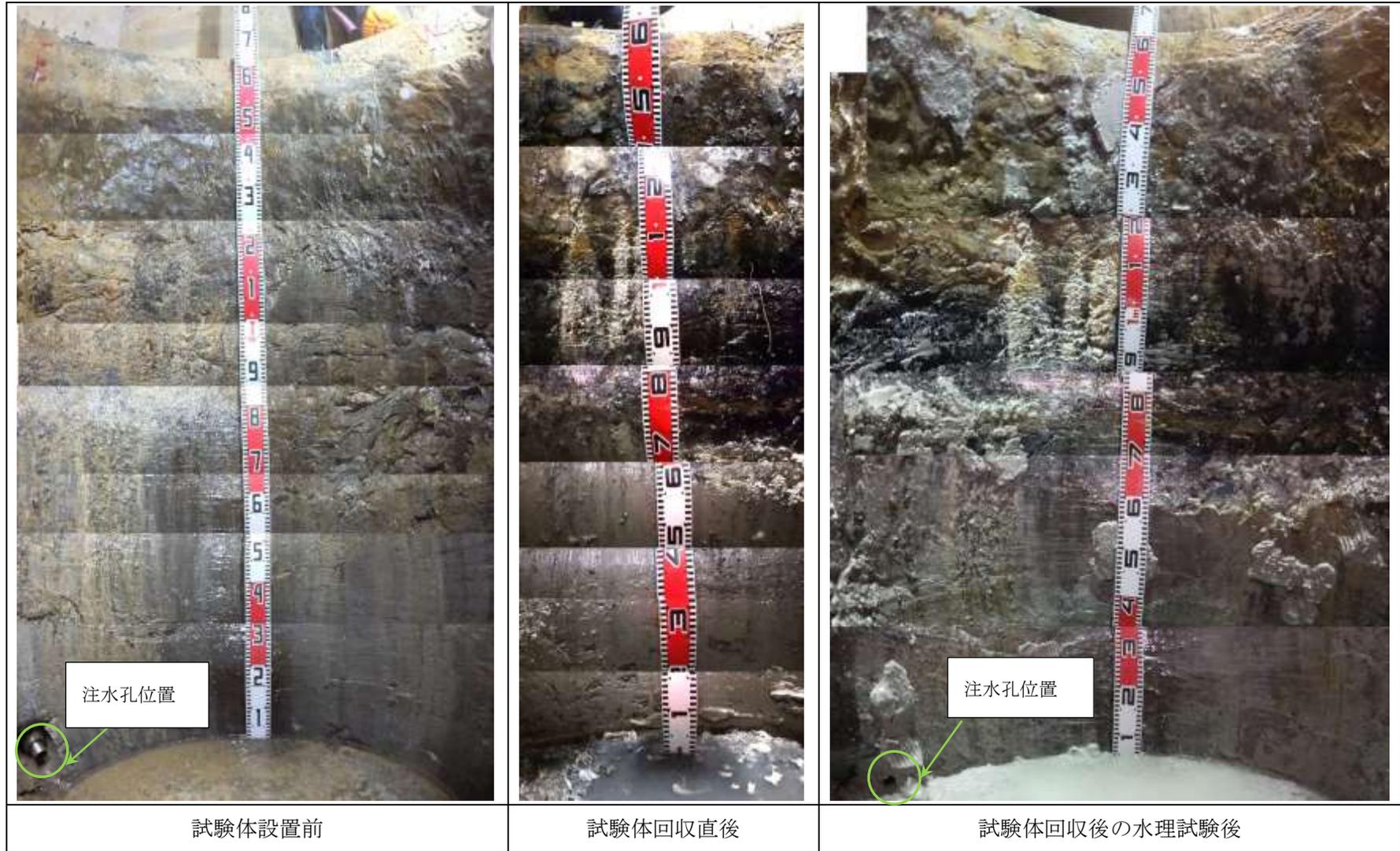


図 4.2.5-12 試験孔壁面写真 (南側) 写真の方位：東 (左) ←南 (正面) →西 (右)

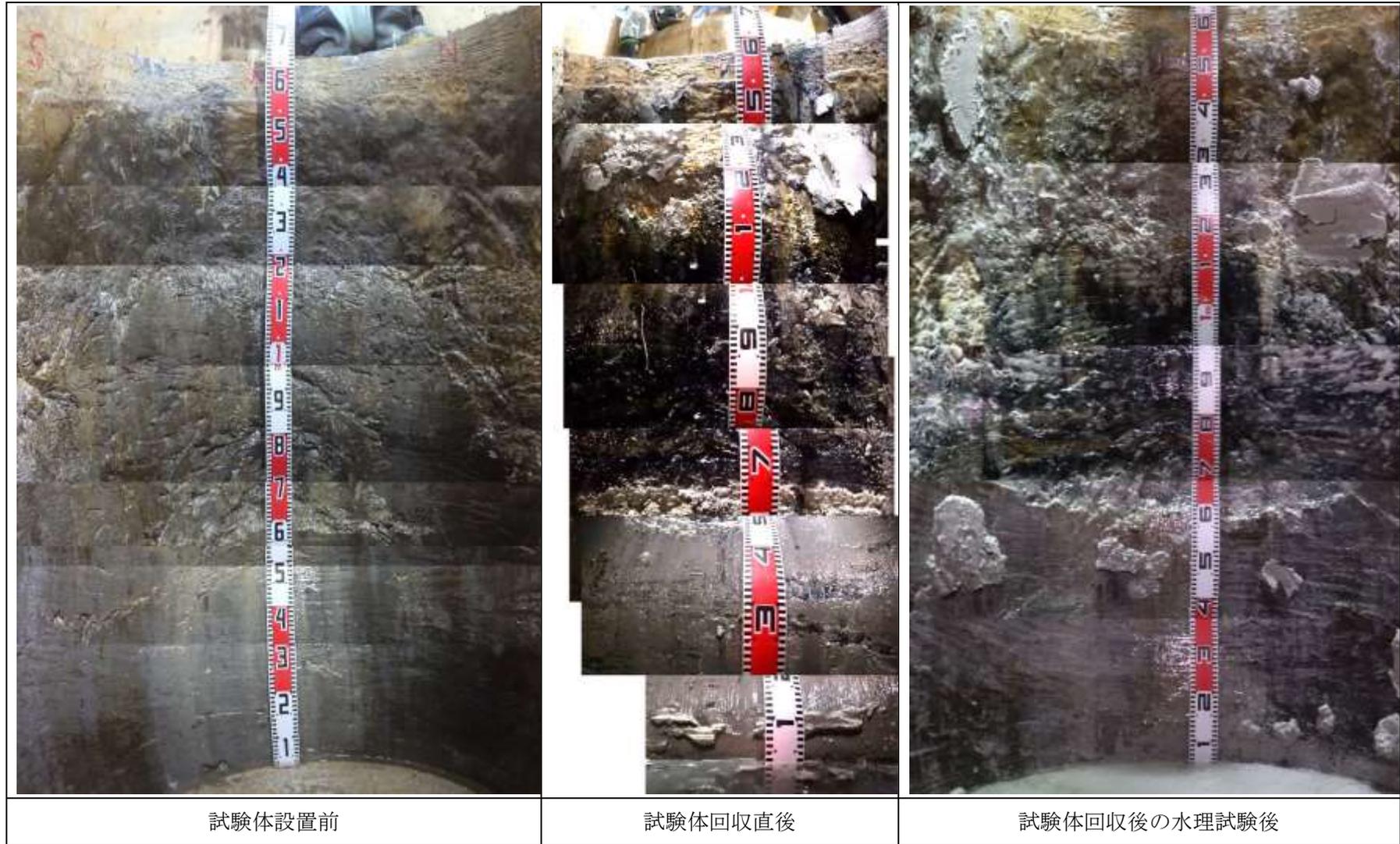


図 4.2.5-13 試験孔壁面写真（西側） 写真の方位：南（左）←西（正面）→北（右）



图 4.2.5-14 試驗孔壁面写真 (試驗体設置前)

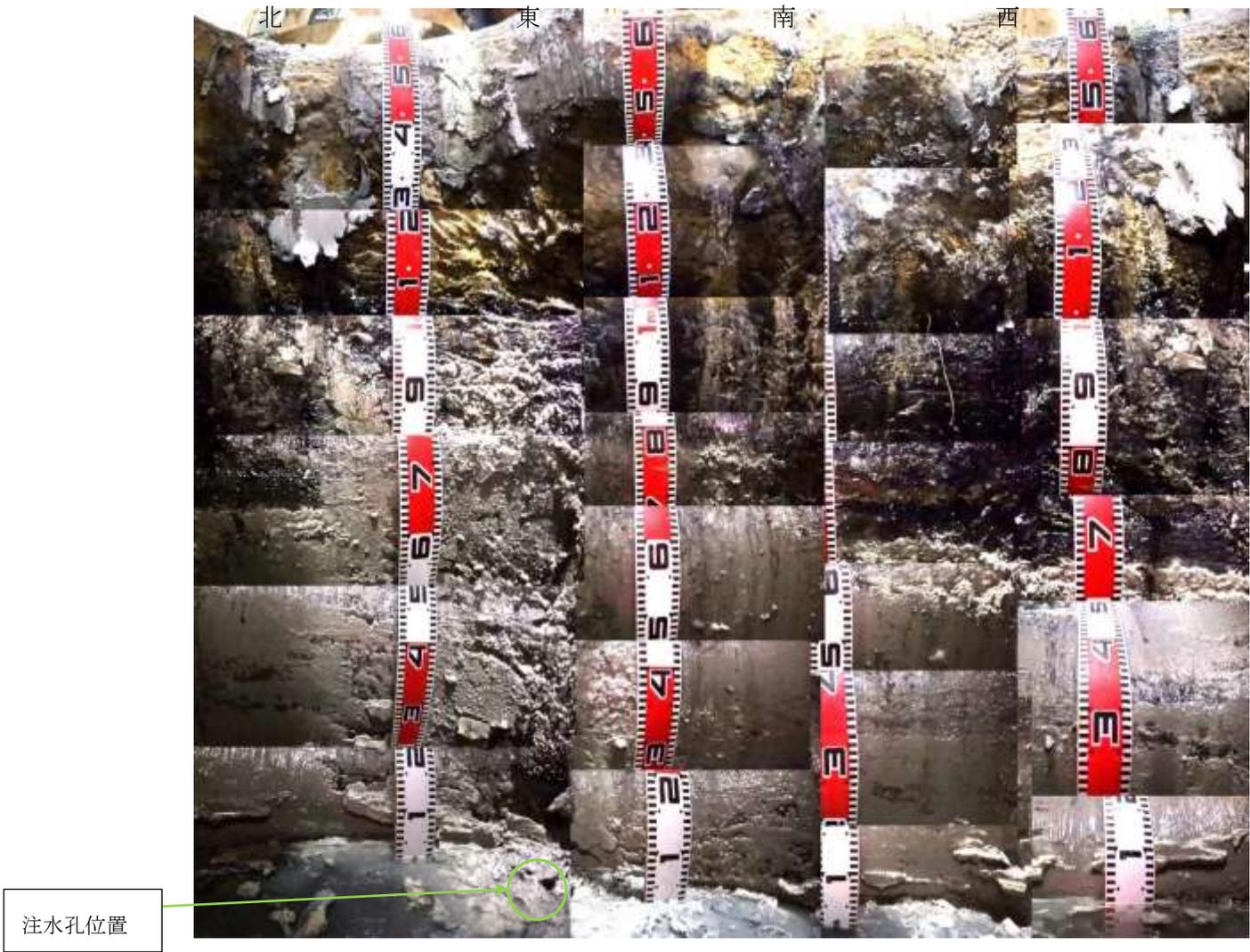


图 4.2.5-15 試驗孔壁面写真（試驗体回収直後）

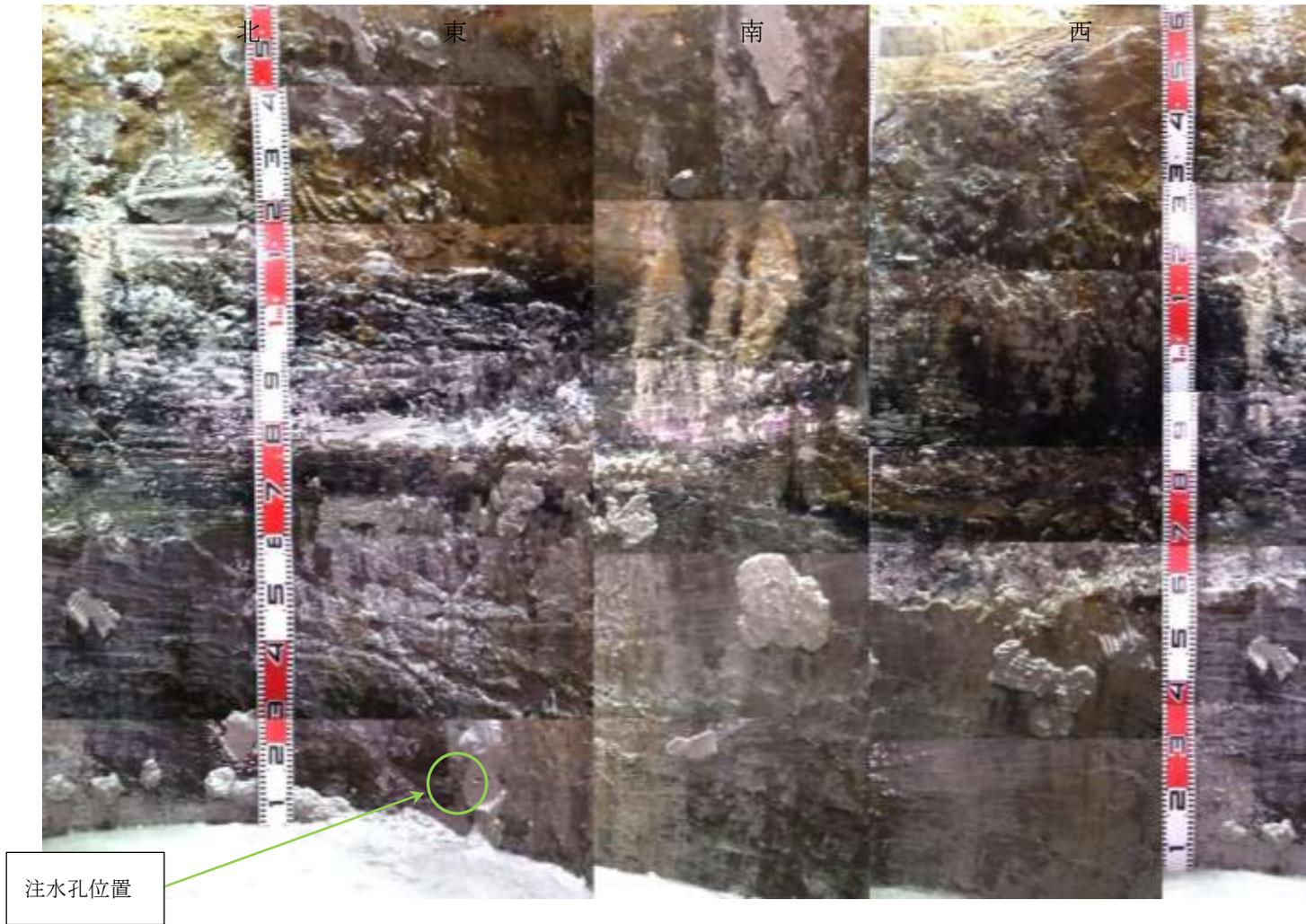


図 4.2.5-16 試験孔壁面写真（試験体回収後の水理試験後）

(3) 緩衝材ブロックの膨潤量測定

試験体を解体する際に、定置治具上に設置されているままで、緩衝材ブロックの膨潤量測定を実施した。測定は、C段（上から3段目）、D段（上から4段目）、F段（上から6段目）で実施した。なお、試験体設置時は、定置治具スペーサ外側から緩衝材外側までの膨潤前の距離が170mmであった。そのため、膨潤後の値との差を膨潤量として整理した。ただし、試験体の回収時に緩衝材外側が孔壁でこすり取られる等により、膨潤後の緩衝材の外側が正確に保持できていない可能性があるため、測定した膨潤量は参考値とした。膨潤量の測定結果のまとめを表4.2.5-1に示し、測定状況を図4.2.5-17～図4.2.5-19に示す。

表より、注水孔の設置位置の方位である東面の膨潤量が最も少ない結果であったことがわかる。試験体設置位置が中心がずれて偏って設置されたことを考慮しても、膨潤量が少ないと考えられることから、緩衝材が流出した結果と推察できる。

表 4.2.5-1 緩衝材外側の膨潤量測定結果（参考値）

	緩衝材外側膨潤量 mm (参考値)				
	北面	東面	南面	西面	平均
C段 (上から3段目)	20	11	13	14	14.5
D段 (上から4段目)	10	10	20	15	13.8
F段 (上から6段目)	10	10	18	15	13.3
平均 mm	13.3	10.3	17.0	14.7	13.8

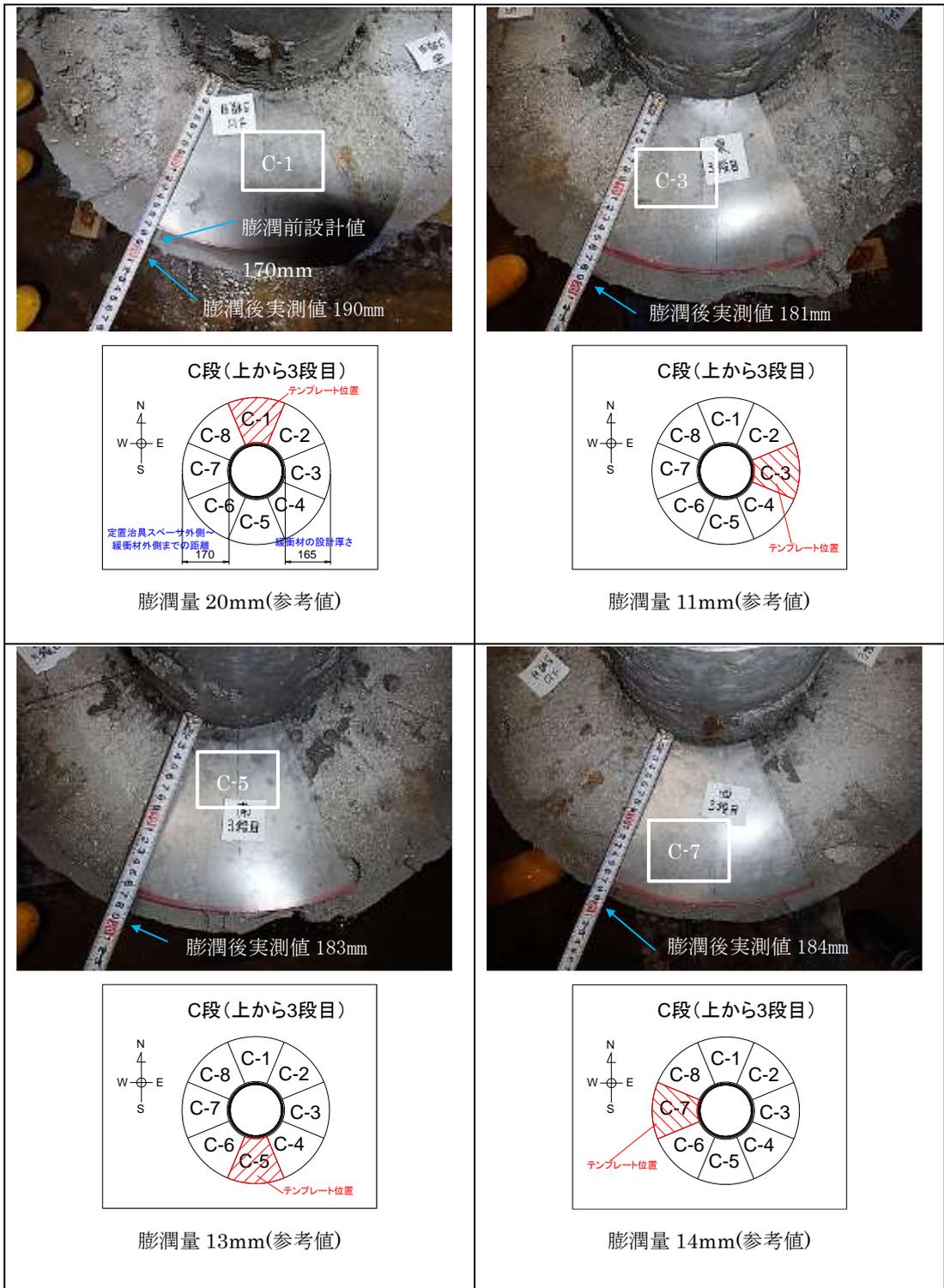


図 4.2.5-17 試験体回収後の膨潤量測定 (C 段)

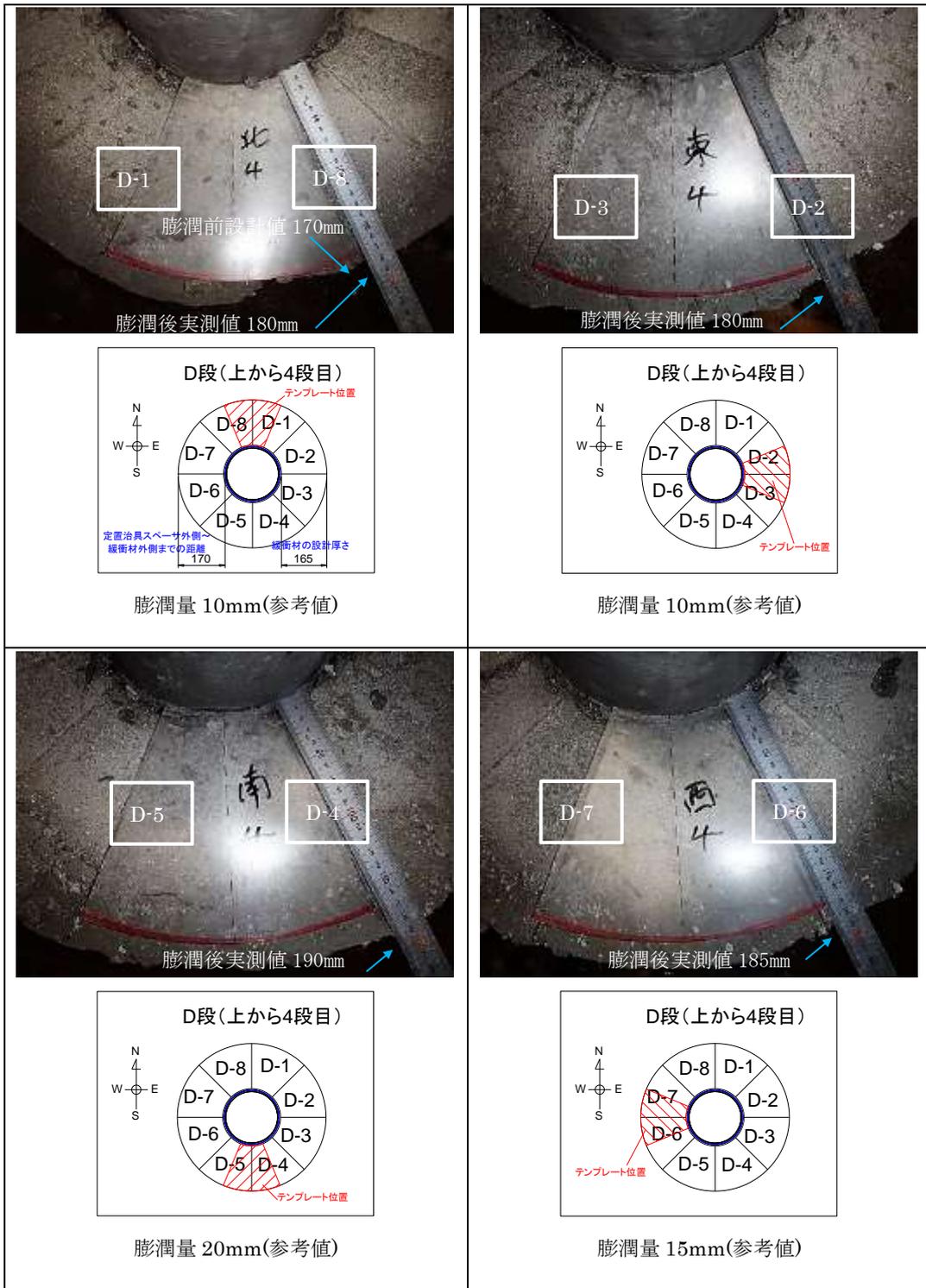


図 4.2.5-18 試験体回収後の膨潤量測定 (D段)

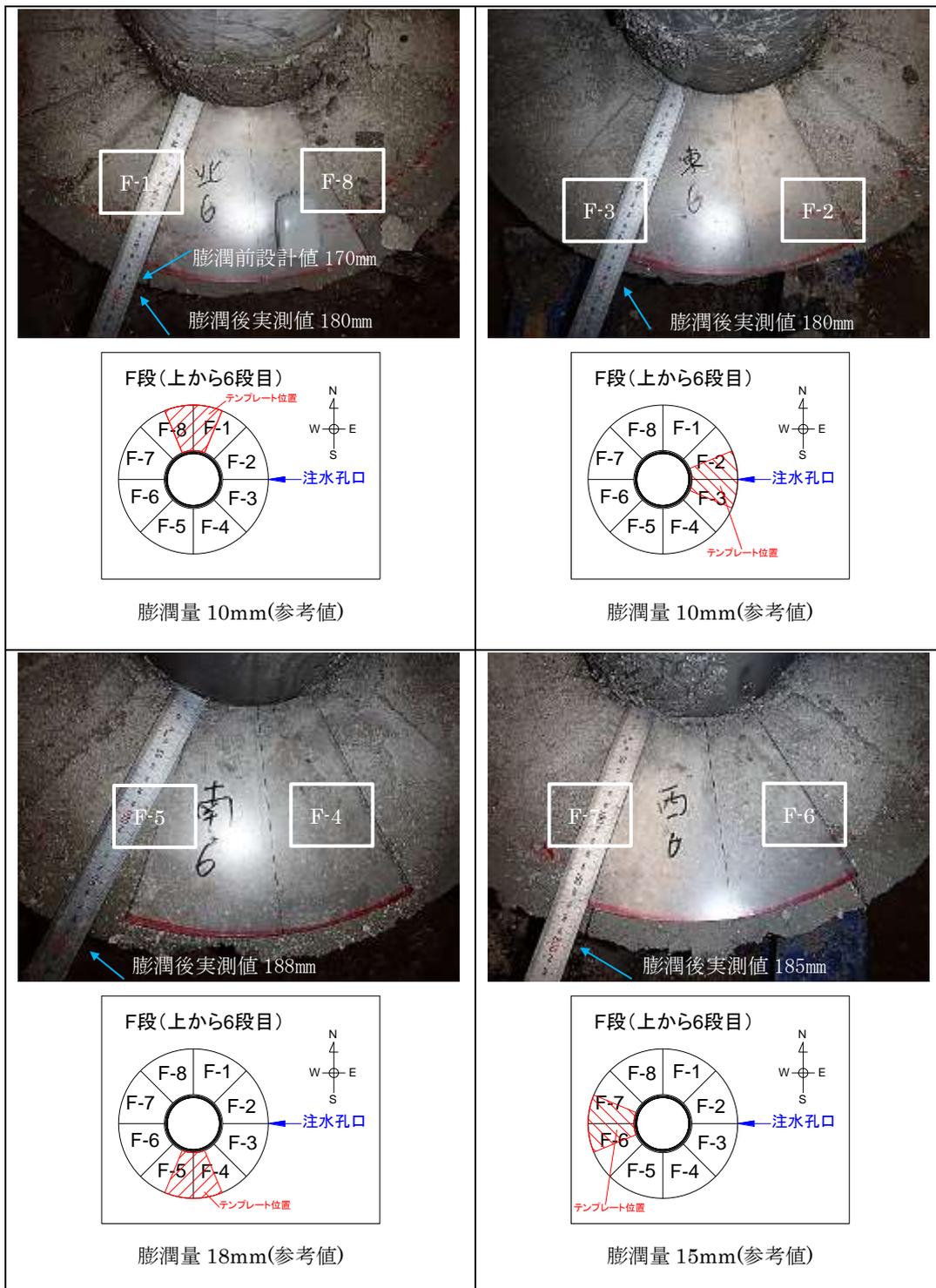


図 4.2.5-19 試験体回収後の膨潤量測定 (F 段)

(4) 採取コアの密度測定・含水比測定

1) コア採取

試験体の解体時に、密度、含水比を測定するためのコアを採取した。試験体の解体状況とコアの採取状況を図 4.2.5-20、図 4.2.5-21 に示す。

試験体の解体は、昨年度と同様に、最上段のブロックについては、電動ピックで削り取る解体方法とし、その他の段については、可能な限り元のブロック毎の形状を保つように、スクレーパ等を用いて解体した。コアは「外側」、「中央」、「内側」の3か所を、試験体の上から「2段目」、「4段目」、「6段目」の3段から、計9か所で採取した。採取したコアの位置を図 4.2.5-22 に示す。



図 4.2.5-20 緩衝材の解体状況



図 4.2.5-21 サンプルング試料の採取状況

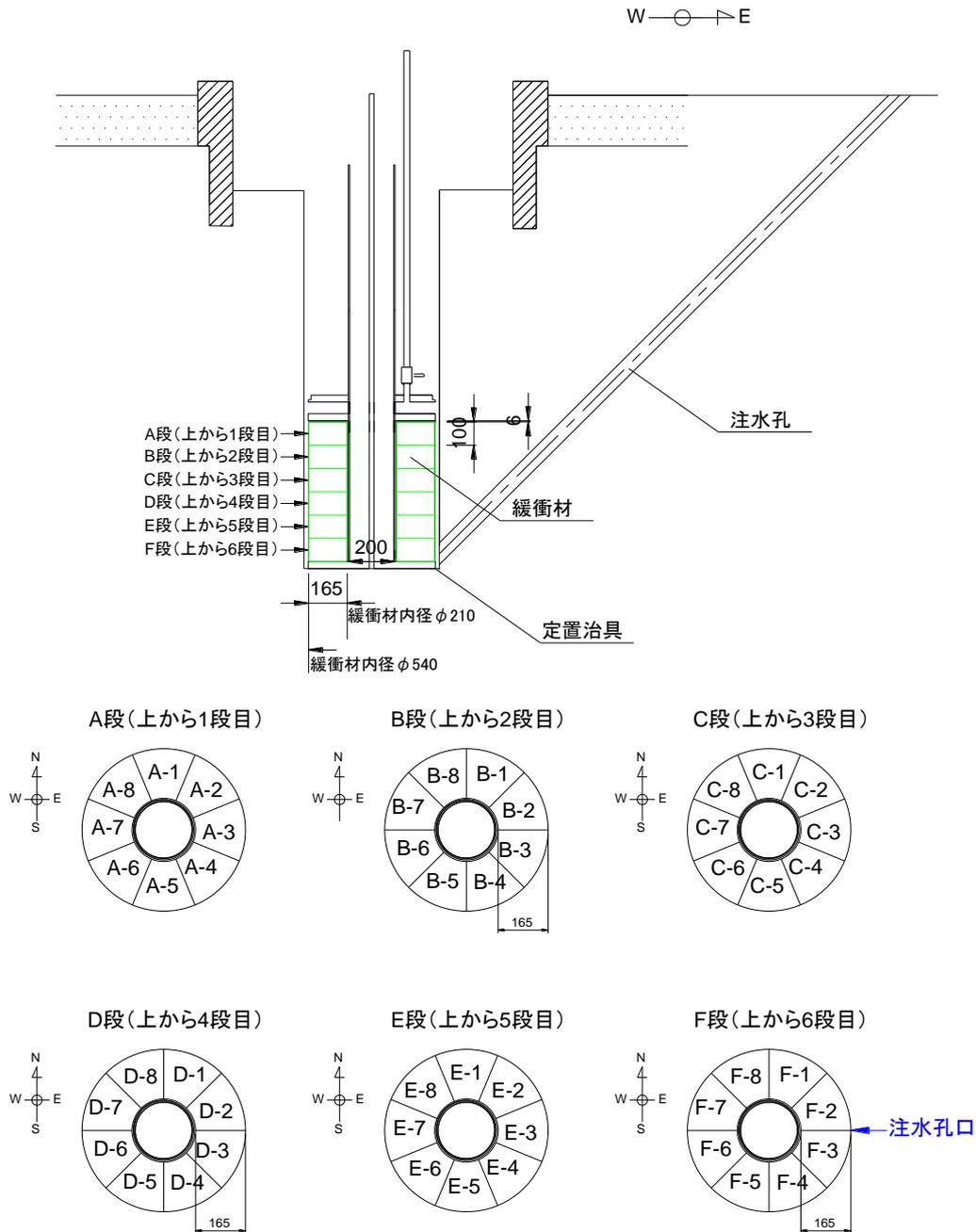


図 4.2.5-22 緩衝材ブロックのナンバリング 説明図

2) 採取コアの密度・含水比測定

採取した試料は、室内試験室に持ち帰り、土の含水比試験 (JIS A 1203)、土粒子の密度試験 (JIS A 1202)、土の湿潤密度試験 (JIS A 1225) [13]等の土質試験を実施した。採取試料として、試験体の上から 2 段目の B-2、4 段目の D-3、6 段目の F-1 から、それぞれ外側、中央、内側の 3 か所、計 9 か所にてコアを採取した。測定結果の一覧を表 4.2.5-2 に示す。

表 4.2.5-2 より、緩衝材の鉛直方向における飽和度を比較すると、上段 (B 段) が最も高く約 83% (平均値)、中段 (D 段) と下段 (F 段) は、ほぼ同程度で約 72% (平均値) であった。一

方、乾燥密度については、下段（F段平均値 1.69g/cm³）、中段（D段平均値 1.64g/cm³）、上段（B段平均値 1.59g/cm³）の順で小さかった。上段部は試験体の構造上（図 4.2.5-23 参照、中蓋と上部に隙間が存在する、など）、湛水しやすく、また緩衝材が変形しやすい状況となっているため、飽和度が高く、乾燥密度は小さくなったと考えられる。

緩衝材の径方向における乾燥密度を比較すると、内側（B-2、D-3、F-1）の平均は 1.63g/cm³、中央（B-2、D-3、F-1）の平均は 1.76g/cm³、外側（B-2、D-3、F-1）の平均は 1.53g/cm³ となり、中央>内側>外側の結果となった。全試料の乾燥密度の平均は 1.64g/cm³ であり、隙間 20mm を設計条件として製作した緩衝材の仕様である膨潤後の乾燥密度 1.60g/cm³ で、ほぼ予定通りの乾燥密度結果となった。含水比については、外側（平均値 26.2%）>内側（平均値 15.2%）≒中央（平均値 15.1%）となった。しかし、外側では 22.3~32.7%、内側では 13.5~17.9%、中央では 13.1~17.3% であり、ばらつきが大きかった。飽和度は、外側（平均値 90%）>中央（平均値 75%）>内側（62%）となり、緩衝材外側から飽和が進行していることを表す結果となった。

表 4.2.5-2 採取したコアの土質試験結果

		上段（2段目）			中段（4段目）			下段（6段目）		
		内側	中央	外側	内側	中央	外側	内側	中央	外側
		B-2	B-2	B-2	D-3	D-3	D-3	F-1	F-1	F-1
湿潤密度	ρ_t g/cm ³	1.901	2.047	1.890	1.780	1.998	1.980	1.947	2.048	1.910
乾燥密度	ρ_d g/cm ³	1.612	1.745	1.426	1.568	1.737	1.624	1.706	1.812	1.545
土粒子密度	ρ_s g/cm ³	2.766	2.759	2.732	2.661	2.681	2.698	2.740	2.761	2.780
含水比	w %	17.9	17.3	32.7	13.5	14.9	22.3	14.1	13.1	23.5
間隙比	e	0.716	0.581	0.916	0.697	0.543	0.661	0.606	0.524	0.799
飽和度	S_w %	69.2	82.2	97.5	51.5	73.6	91.0	63.8	69.0	81.8
平均直径	D cm	2.995	2.995	2.995	2.995	2.995	2.995	2.995	2.995	2.995
平均高さ	H cm	7.155	6.263	6.619	6.246	7.036	5.035	6.693	6.033	7.247
コア体積	V cm ³	50.41	44.12	46.63	44.0	49.57	35.47	47.15	42.50	51.06

B段(上から2段目)

D段(上から4段目)

F段(上から6段目)

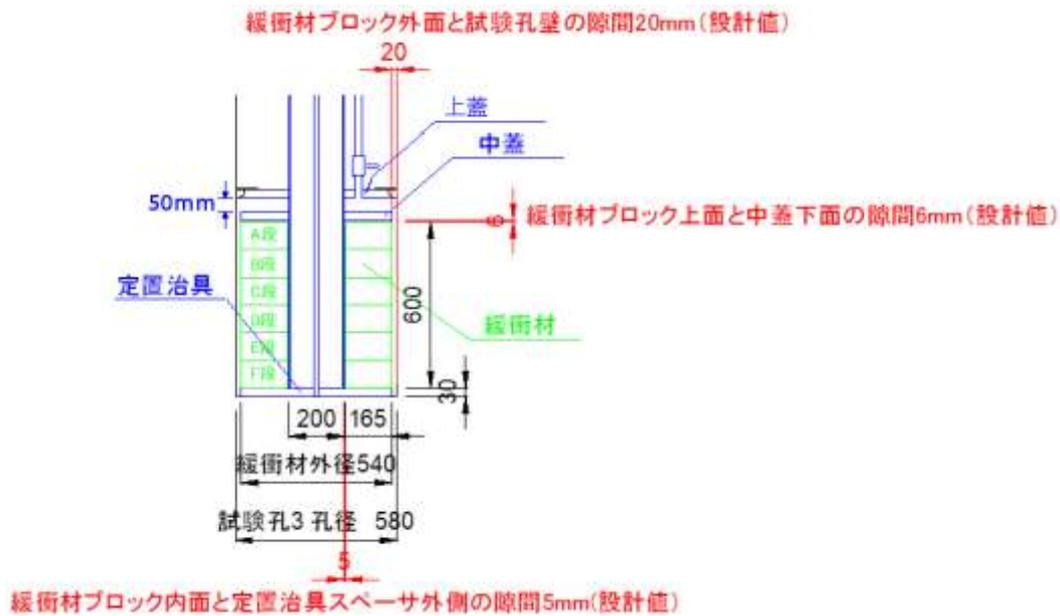


図 4.2.5-23 試験体の試験孔内設置時の隙間 説明図

同じ段において設置方位の違いを比較するため、緩衝材最下段の（F 段、上から 6 段目）の最外周部について、各ブロック（8 個）から試料を採取し、含水比測定を実施し、その結果を表 4.2.5-3 と図 4.2.5-24 に示す。

表 4.2.5-3 より、緩衝材最下段の（F 段、上から 6 段目）の最外周部の含水比は、緩衝材ブロックごとで異なりばらつきが大きいことがわかる。また、図 4.2.5-24 より、注水孔口に近い位置（F-1～4）の含水比が低い傾向であることがわかった。なお、8 試料の平均の含水比は 33.2%となった。これは、注水孔口に近い位置の緩衝材については、含水比の高くなった表面部分は試験中に流出し、含水比がまだ低い部分が残留したことが考えられる。

表 4.2.5-3 緩衝材ブロック（F 段、上から 6 段目）の最外周部の含水比

外周からの距離 cm	含水比 %							
	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	F-7	F-8
1	25.8	31.8	29.4	28.7	43.9	42.4	32.9	30.8

F段(上から6段目)

全体の含水比平均 33.2%

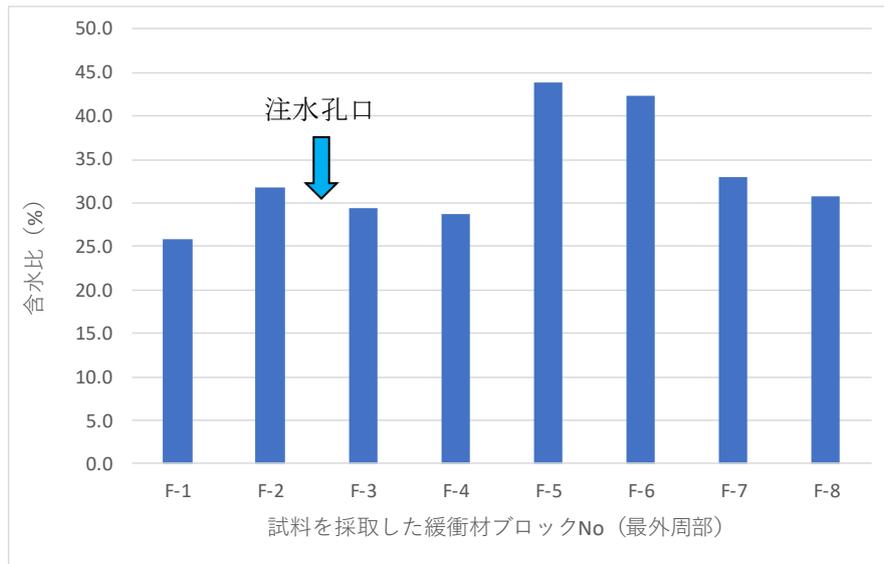


図 4.2.5-24 緩衝材ブロック (F 段、上から 6 段目) の最外周部の含水比試験結果

緩衝材の径方向の含水比および乾燥密度を測定した。図 4.2.5-25 に各段における緩衝材ブロックの名称を、表 4.2.5-4、図 4.2.5-26 に緩衝材の径方向の試験結果を示す。

図 4.2.5-26 より、緩衝材ブロックの径方向の含水比は、バラツキがあるものの、外周から中心に向かって低くなり、中心部付近で若干高くなる結果となったことがわかる。前掲の図 4.2.5-23 に示す通り、試験体の試験孔内への設置時は、最上段 (A 段) の緩衝材ブロック上面と中蓋下面に約 6mm の隙間があり、各段の緩衝材ブロックの内側表面と定置治具外側の境界面には、約 5mm の隙間があることがわかる。そのため、膨潤直後には湧水が浸入しやすかったと考えられる。

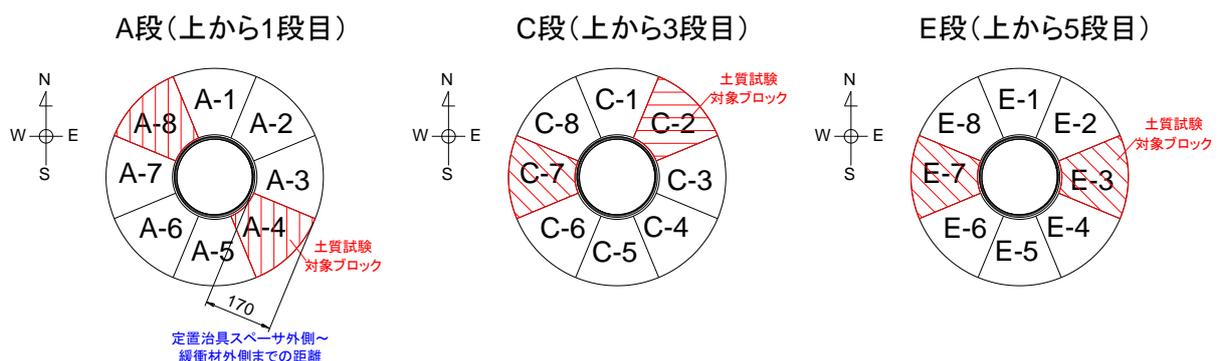


図 4.2.5-25 各段における緩衝材ブロックの名称

表 4.2.5-4 緩衝材の径方向の含水比

外周からの距離 cm	含水比 %					
	上から1段目		上から3段目		上から5段目	
	A-4	A-8	C-2	C-7	E-3	E-7
1	94.2	51.9	41.5	28.2	30.8	34.4
3	49.8	32.9	27.9	22.2	22.9	25.0
5	29.2	25.5	22.2	18.9	19.9	20.8
7	-	-	19.2	16.5	17.2	18.0
9	-	-	16.6	14.5	15.1	15.6
11	-	-	14.5	14.1	13.7	17.9
13	-	-	13.8	14.1	13.5	13.3
15	-	-	14.2	14.8	9.4	14.1
17	-	-	17.4	17.3	20.9	16.0

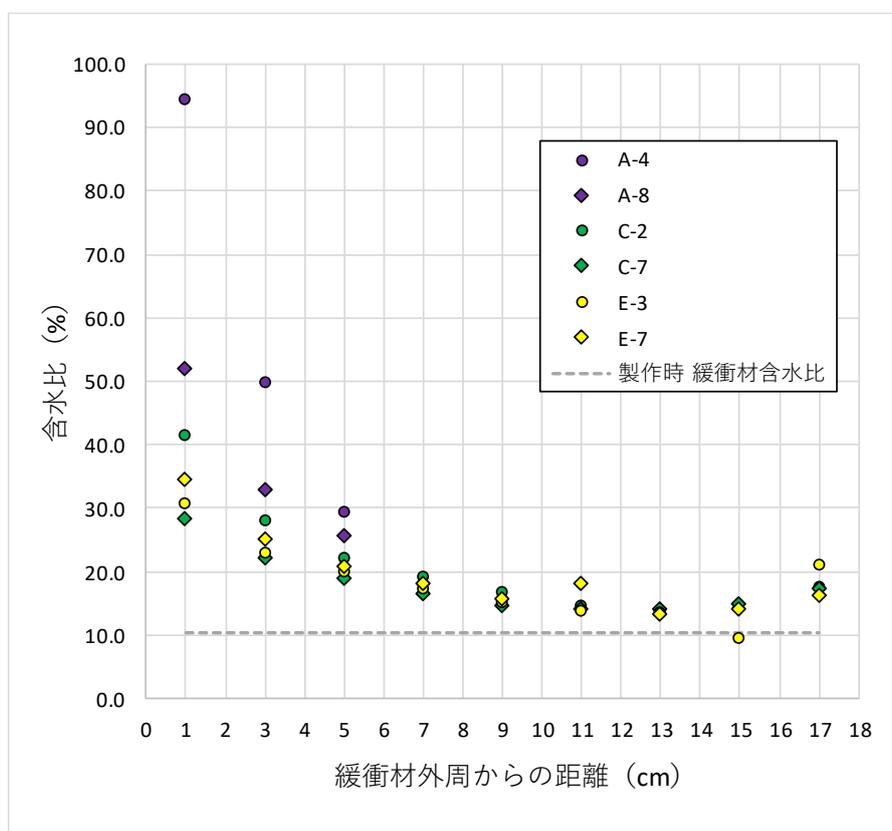


図 4.2.5-26 緩衝材の径方向の含水比試験結果

表 4.2.5-5、図 4.2.5-27 に緩衝材の径方向（外周から 1、3、5cm 位置）の密度試験結果を示す。

図 4.2.5-27 より、緩衝材ブロックの径方向の乾燥密度について、緩衝材外周から 1cm 位置での平均は 1.12g/cm³、3cm 位置での平均は 1.27g/cm³、5cm 位置での平均は 1.38g/cm³となった。傾向としては、外側から内側にむかい乾燥密度が高い結果となった。

表 4.2.5-5 緩衝材の径方向の密度試験結果

外周からの 距離 cm	乾燥密度 g/cm ³					
	上から1段目		上から3断面		上から5段目	
	A-4	A-8	C-2	C-7	E-3	E-7
1	0.738	0.881	1.080	1.356	1.384	1.304
3	1.024	1.237	1.118	1.329	1.382	1.555
5	1.325	1.354	1.230	-	1.394	1.579

- : 測定出来ず

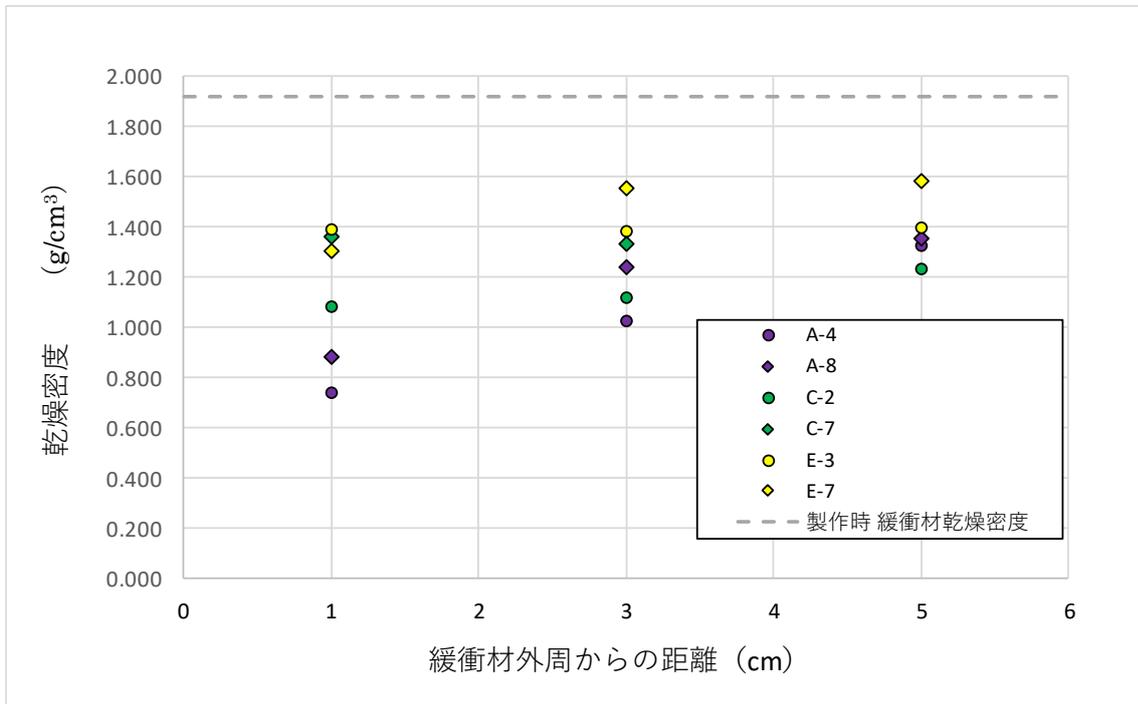
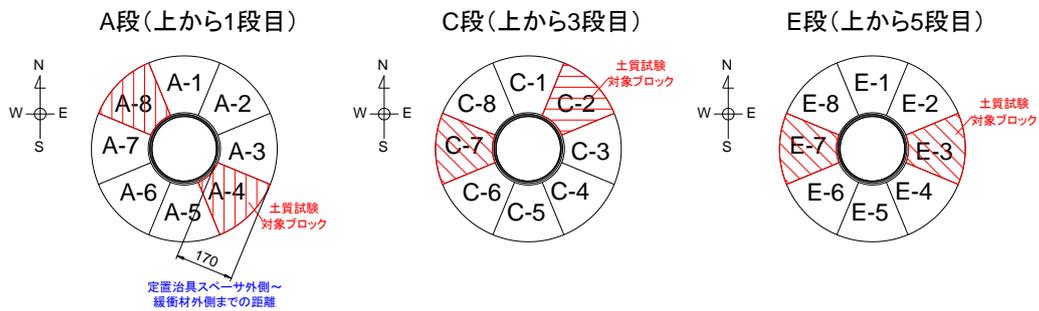


図 4.2.5-27 緩衝材の径方向の密度試験結果

4.2.6 原位置における緩衝材エロージョン量について

平成 27 年度より、原位置における緩衝材流出試験を実施してきた。ここでは、平成 28 年度に実施した 2 種類の原位置試験における送水量とエロージョン量の関係を調べ、室内試験と比較することとした。原位置試験では室内試験と同様な方法でエロージョン量を測定することができない。そのため、各試験における送水量とエロージョン量の求め方を以下に記す。

①Case2 (試験体定置のまま) の場合 (H28 年度実施)

- ・送水量：注水流量である 0.1mL/min に試験時間を乗じて算出
- ・エロージョン量：試験時間における採水の緩衝材濃度からの積算

②Case3 (上蓋設置) の場合 (H28 年度実施)

- ・送水量：排水時 (バッチ式排水による排水時刻) の排水量
- ・エロージョン量：排水時における採水の緩衝材濃度からの積算

算出した送水量とエロージョン量の関係を図 4.2.6-1 に示す。比較のため室内試験結果も併せてプロットした。図より、原位置試験の結果は、室内試験において同じ材料 (クニゲル V1) で作成された緩衝材を使用した結果と、傾きが概ね同じであることがわかった。ただし、Case2 (試験蓋をしない場合) には、総水量が 1000L を超えると傾きが大きくなる傾向がみられた。これは、緩衝材の長期性能に影響を及ぼす可能性があるため、更なる調査、検討が必要である。一方、異なる材料 (MX80) で作成された緩衝材を使用した場合は、クニゲル V1 の場合よりも傾きが小さかった。これは、総水量が少ない場合に顕著であった。これより、緩衝材の材料 (ベントナイトの種類) によってエロージョン特性が異なることが推察される。

また、同じ送水量に対する緩衝材のエロージョン量は、室内試験の方が少なかった。これは、原位置が湧水環境であることに起因していると考えられる。

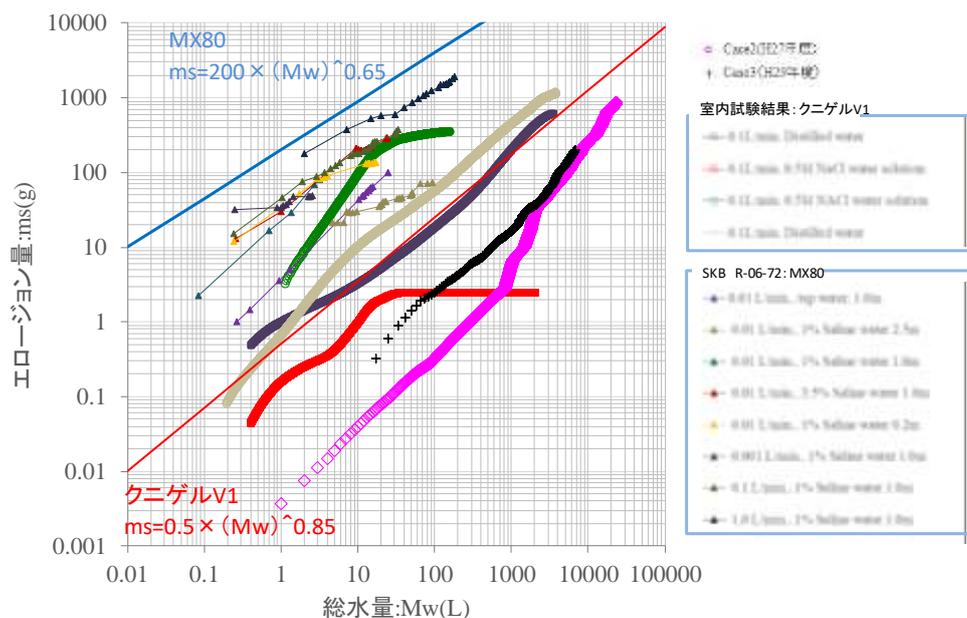


図 4.2.6-1 送水量と緩衝材エロージョン量の関係

4.2.7 まとめ

実際の処分環境に近い地下環境下（処分孔に湧水がある環境）において、各種の試験を実施しデータを取得することにより、緩衝材の水みち形成や流出現象に関する知見を整備・蓄積する事を目的として、試験を実施した。今年度実施した試験の結果を以下に記す。

- ・試験体周辺岩盤の透水特性として、試験体定置前の透水係数が概ね $10^{-5} \sim 10^{-6}$ (m/sec) 程度であることを水理試験によって把握した。透水係数 10^{-6} (m/sec) オーダーの結果は、本試験場所である幌延 URL における掘削影響領域と想定される岩盤の透水係数と同等の値であり、注水した水が周辺岩盤へ流れる可能性があることが示唆された。一方、注水試験実施後の試験体の回収直後に水理試験を実施した結果、周辺岩盤の透水係数は、概ね 1.0×10^{-6} m/sec となり、緩衝材の膨潤等の挙動による影響が周辺岩盤の透水性を下げた可能性が示唆された。
- ・注水試験を実施する前に、緩衝材の上方への膨潤変形を抑制する（蓋の設置）条件で、試験体を試験孔内へ定置し、岩盤孔壁と緩衝材の間の隙間（約 2cm）を、あらかじめ緩衝材を膨潤させることによって埋める期間を取った。その間の緩衝材と孔壁の間に設置した土圧計の測定結果から、上部、中部、下部の順に土圧が発現し、約 2 ヶ月（1456 時間）でほぼ一定となった。また、この圧力値は約 1.0MPa～1.4MPa となり、理論式等から、膨潤による止水性能を発揮できる値であると判断できた。
- ・定流量注水試験の結果、注水流量 20～30mL/min と過年度の結果よりも少ない流量の条件下で、注水孔付近から試験体上部へ連通する経路（緩衝材と孔壁間、岩盤中の割れ目など）を通じて、緩衝材の一部が流出する現象が発生した可能性があることがわかった。試験体回収後の緩衝材の表面において、流出経路とみられる場所で珪砂分が多く残留していたことは、室内試験においてパイピング部に珪砂分が多く残留していた現象と類似していた。
- ・注水試験の実施期間全体を通しての水圧の変化や、採水試料のベントナイト濃度の変化に着目すると、注水圧力や試験孔内部の水圧が徐々に上昇していること、および土圧（膨潤圧）が 1MPa を超える値で安定または緩やかな上昇傾向であること、さらに、採水ホース（上蓋の下）からの採水によるベントナイト濃度が、試験初期を除いて、0～200mg/L と低い値となり、突出した濃度上昇も見受けられなかったことから、本試験期間において緩衝材の膨潤変形による自己修復機能は進展途中にあることも考えられる。

これまでの原位置試験を通じて得た成果や課題・疑問は、実規模での作業を想定した施工技術の開発への提言、など今後の研究方針の立案に資するものと考えられる。緩衝材設計に際して考慮すべき要素である緩衝材の流出現象の知見を、条件を設定して行う室内試験と併せて取得し、更なる成果を得られるよう、有意義な原位置試験を計画・実施していくことがより重要になる。

4.3 緩衝材の流出抑制の対策と解析技術への反映

これまで行ってきた、緩衝材流出に関する室内試験、および地下研究施設での試験の結果を基に、工学的対策の考え方、および再冠水プロセスや再冠水後の緩衝材の状態を予測するための解析手法への反映の仕方について、以下に述べる。

4.3.1 流出現象に対する工学的対策

(1) 緩衝材や埋め戻し材等の材料特性としての許容流速の整理

SKB社では、実験から取得した流量と緩衝材流出量の関係を用いて処分孔の許容される流量と緩衝材流出量に対して基準を設けるべく検討を行っている。その検討手順は、以下のようにされている。

- ① 流量と緩衝材流出量の関係を得する。
- ② 処分場の地下水流動解析から、各処分孔からの湧水量を算出する。
- ③ ①の流量と緩衝材流出量の関係の関係を地下水流動解析結果に適用し、湧水量と同時に緩衝材流出量を算出する。
- ④ 許容される流速と緩衝材流出量の基準に照らして処分孔としての適性を評価する。

また、検討では、緩衝材流出を防ぐために、なるべく早く処分孔を閉鎖する必要性を示しており、処分孔を閉鎖する順番による地下水挙動の変化なども考慮して処分孔を閉鎖する順番などについても検討している。

この方法にならって、処分孔として許容される流量を決定するフローを考える。処分孔における緩衝材の性能は、力学・水理・化学・熱的な緩衝性等である。この性能を満足しているかどうかを評価するための代替パラメータとして乾燥密度 ρ_d に基準値 $\bar{\rho}_d$ が与えられている。

いま、施工した処分孔の緩衝材の体積 V 、乾燥質量 M とすると、施工した緩衝材は、

$$\bar{\rho}_d < \frac{M}{V} \quad \text{式 4.3-1}$$

を満足しなければならない。また、基準乾燥密度 $\bar{\rho}_d$ となる緩衝材の体積と乾燥質量が V 、 \bar{M} で与えられるとすると、

$$\bar{\rho}_d = \frac{\bar{M}}{V} \quad \text{式 4.3-2}$$

で表される。この時、処分孔当たりの許容される緩衝材流出量（乾燥質量） E は、

$$E = M - \bar{M} \quad \text{式 4.3-3}$$

で与えられる。ここで、緩衝材流出量（乾燥質量） E となる総湧水量 Q は、前述の室内試験から、

$$E = \beta Q^\alpha \quad \text{式 4.3-4}$$

で与えられるため、許容される総湧水量 Q が、

$$Q = \sqrt[\alpha]{\frac{E}{\beta}} \quad \text{式 4.3-5}$$

で与えられる。いま、ある処分孔において、緩衝材を施工してから閉鎖するまでの時間を T とすれば、許容される流速 q が、

$$q = \frac{Q}{T} = \frac{1}{T} \sqrt[q]{\frac{E}{\beta}} = \frac{1}{T} \sqrt[q]{\frac{M - M'}{\beta}} \quad \text{式 4.3-6}$$

で与えられる。ここで、許容される流速 q をなるべく大きくして処分可能な孔を多く確保するためには、止水工法や地下水低下工法などで流速 q を小さくさせる以外には、閉鎖するまでの時間 T を短くするか、施工する緩衝材の密度を高める（処分孔当たりの緩衝材の乾燥質量 M を大きくする）以外に工学技術としての対策はない。また、許容される流速 q と緩衝材が施工可能な流速の大小関係についても検討が必要である（図 4.3.1-1 参照）。

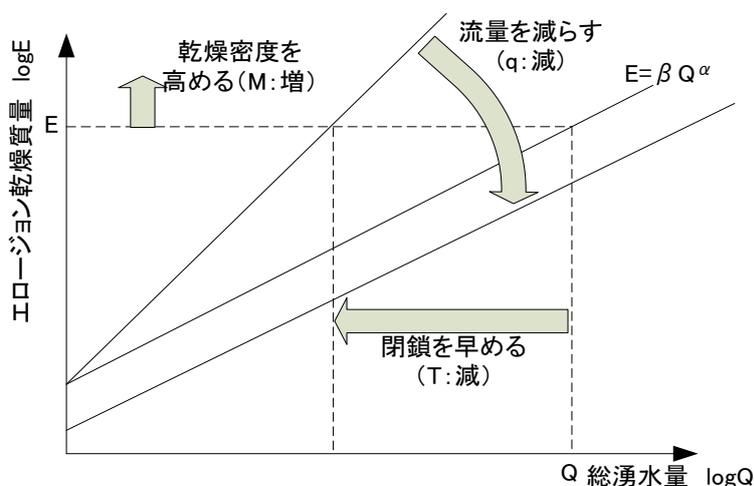


図 4.3.1-1 流量と緩衝材流出量の関係における湧水対策の意味

(2) 閉鎖を早める対策

前述のように、緩衝材の流出現象の対策の一つとして、閉鎖時期を早めることは有効である。その一方で、平成 27 年 5 月に改定された特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針【●】においては、地層処分事業に対して回収可能性を維持することが求められた。

処分孔の掘削後から閉鎖までの想定される工程は、①緩衝材の施工、廃棄体定置、②処分孔の埋め戻し、③処分孔の端部プラグ設置、④連絡坑道の埋め戻し、④閉鎖（アクセス坑道の埋戻し）、である。処分施設を閉鎖する前の段階では、連絡坑道は水位が下がっており、地下水は処分坑道から連絡坑道に向かって流れるものと考えられる。回収可能性を維持するためには、仮に連絡坑道を開けた状態を維持状態とすると、ある程度の緩衝材の流出を許容する必要があり、回収可能性維持と緩衝材流出現象による緩衝材量の減少はトレードオフの関係にある。

よって、緩衝材流出抑制の観点からは、回収可能性維持期間を全く設けずに、閉鎖した処分坑道は、随時、埋め戻し、水位を回復させるという対策が考えられる。縦置き処分方式の場合は、処分孔毎に端部プラグと埋め戻し材を施工し、人工給水させ、膨潤圧の反力は埋め戻し材から取るという方法が考えられる。横置き処分方式の場合は、廃棄体定置後、その都

度、コンパートメントプラグを施工して人工給水し、所定量の廃棄体を定置した後に処分坑道の端部プラグを施工する。処分済みの処分坑道までの連絡坑道を埋め戻し、地下水を回復させることが最も合理的であると考えられる。閉鎖時期を早める対策の場合、連絡坑道の埋め戻しだけでなく、地下水位を回復させる必要があるため、水位回復用のプラグを段階的に設置することが有効となる。

(3) 流量を減らす対策

廃棄体の回収可能性を長期間維持するために、埋め戻しをしないで、水位を下げておく場合には、処分孔の湧水量を極力小さくする必要がある。そのためには、揚水による地下水位の低下や裏面排水シートや一次・二次覆工などの水密構造を採用するなどの対策が考えられる。しかしながら、有機物の防水シートで水密構造を維持し続けることは実績がなく、無機の防水シートもないことから実現性が不確実である。そこで、一次覆工と二次覆工の間にベントナイト遮水層を介在させる水密構造が考えられる。このベントナイト遮水層の構築は、吹付け工法か二次覆工の背面にプレキャストでベントナイトブロック設置する施工も可能であると考えられる。この水密構造の処分孔を構築するためには、土圧と水圧に耐える力学構造にする必要があり、施工費が大幅に増加するが、その一方で、湧水による緩衝材の流出に対する対策を施工時から維持管理時まで実施する必要がなくなること、処分孔からの排水処理をする必要がなくなるなどのメリットも見込める。

揚水による対策も実現性は高いが、排水に環境基準を上回る溶解物が存在する場合、回収可能性維持期間中、継続的に排水処理をしなければならない。

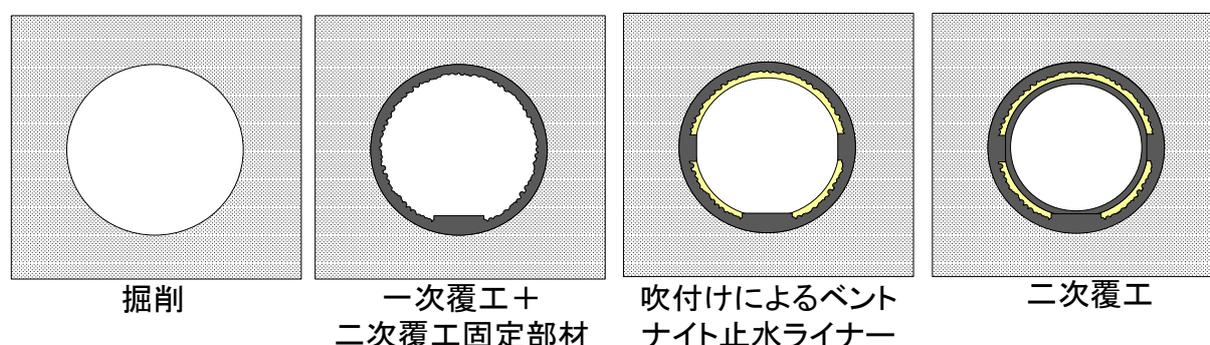


図 4.3.1-2 削孔→1次覆工→ベントナイト吹付け→2次覆工

(4) 緩衝材の乾燥密度（乾燥質量）を高める対策

前述のような、許容される緩衝材流出量が、総流量と緩衝材流出量の関係から規定される場合、乾燥密度が一定であれば、緩衝材の体積が大きい方が、許容される緩衝材流出量が大きくなり、回収可能性期間を長く設定できる。逆に、処分坑道の体積が一定であれば、乾燥密度を高くすれば、回収可能な期間を長くできる。乾燥密度が高くなると膨潤圧が大きくなるため、水みちが小さくなり、その効果で緩衝材流出量が低減する可能性もある。

乾燥密度の値は、施工方法によって達成可能な値が異なるため、このような対策は施工方法

選択条件となり得る可能性がある。一方、処分坑道の体積を大きくすることは、処分施設全体の設計に関わり、施工に対しても不利になるが、幅広く施工方法を選択できるという長所がある。

(5) 試験結果に基づく対策フロー（要確認）

緩衝材流出に関する試験では、処分孔の緩衝材表面近傍で発生する、この現象について、破過、水みちの発生、緩衝材流出の各現象の発生状況を小規模試験によって観察した。その中で、湧水量が 0.1L/min の場合、通水初期には多くの水みちが発生していても、最終的には1つの大きな水みちに収斂する可能性があることを示した。このことは、蒸留水でも 0.5mol/mol の NaCl 水溶液でも同様であった。実際の処分孔であっても最終的に1つの大きな水みちに収斂するのであれば、小規模試験であっても、実際の処分孔で生じていることと同じ現象を観察できていることになる。よって本検討をパラメトリックスタディーとして実施して、地下水イオン強度ごとの緩衝材流出が発生する流量を取得し、別途、施工可能な湧水量を施工試験によって取得できれば、本検討結果によって処分孔としての使用可否、および湧水を有する処分孔の緩衝材の最適な施工法などを決定する基準値を与えることができる。

図 4.3.1-3 に、処分孔としての使用可否、および湧水を有する処分孔の緩衝材の最適な施工法などを決定するチャートにおける検討結果の反映先を示す。なお、図 4.3.1-3 に示すフローは、ある一定期間、廃棄体の回収可能性を維持するという前提の下で記述されており、回収可能性維持の期間を変化させるという対策は対象外としていることに注意が必要である。よって、下記のフローにおいて記述される限界流速は、実際には閉鎖を早めることで、変化させることができる。

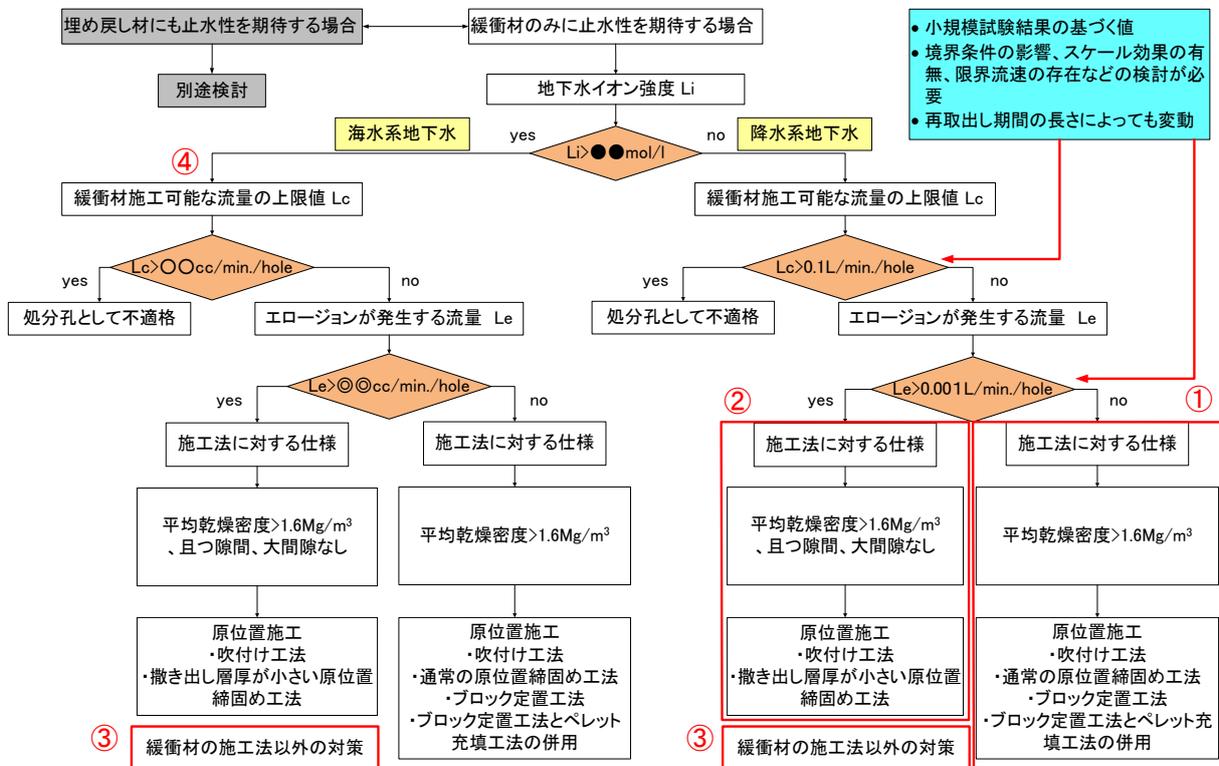


図 4.3.1-3 処分孔としての使用可否、および湧水を有する処分孔の緩衝材の最適な施工法の

平成 24 年度の緩衝材流出試験の結果[○]においては液種が蒸留水であり、

①湧水量 Le が $0.001\text{L}/\text{min}$ 以下の場合

処分孔において緩衝材流出は発生しないという結果になった (図 4.3.1-3①)。つまり湧水量が $0.001\text{L}/\text{min}$ 以下であれば、緩衝材の施工法として原位置施工のうち吹付け工法、原位置閉め固め工法、ブロック定着工法、ブロック定着工法+ペレット充填工法の併用のすべてが採用可能である。

② 湧水量 $Le > 0.001\text{L}/\text{min}$ の場合 (回収可能期間は一定)

【対策 1】: 緩衝材ブロックの緩衝材流出を防ぐために、ペレットを岩盤と緩衝材ブロックの間に充填する対策が考えられる。これは、前述の緩衝材の乾燥質量を増加させる対策に類する。さらに、水みちが収斂する時間を遅らせて、水みちの流速が急激に増加することを抑制する効果も期待できる。さらに、供試体内への地下水浸潤量を増やし、界面の水流れを減少させる効果や膨潤により岩盤から処分孔内への湧水量を減らすという効果も期待できる。これらは、前述の流量を減らす対策に類するものと考えられる。

【不確実性】: 現段階では、許容される上限の湧水量が明確になっていないが、本検討結果に基づいて決定すれば、 $0.001\text{L}/\text{min}$ では緩衝材流出は発生せず、 $0.005\text{L}/\text{min}$ では緩衝材流出が発生したことから、 $Le = 0.005\text{L}/\text{min}$ と考えることができる。ただし、これは、緩衝材のみに止水効果を期待する場合の値であり、処分孔や処分坑道の仮端部プラグの設置などの対策があればその値を更に大きくできる。また、回収可能性期間の設定によってもその値が変わることを付記する。

【対策 2】: 吹付け工法、現場締め固め工法によって、緩衝材の隙間をなくし均質な乾燥密度を施工する対策が考えられる。これは、前述の緩衝材の乾燥質量を増加させる対策に類する。さらに、供試体内への地下水浸潤量を増やし、界面の水の流れを減少させる効果や膨潤により岩盤から処分孔内への湧水量を減らすという効果も期待できる。これらは、前述の流量を減らす対策に類するものと考えられる。

【不確実性】: 吹付け工法の場合、平成 24 年度の施工技術高度化試験において、総湧水量は $0.1\text{L}/\text{min}$ の条件で施工を行った。この場合の 1 つの孔当たり $0.0037\text{L}/\text{min}$ (Case1) の場合と $0.03\text{L}/\text{min}$ (Case2) および $0.003\text{L}/\text{min}$ (Case3) である。施工は順次、湧水箇所を模擬したノズルを吹付けで閉塞させながら施工するものであり、最終的に残ったノズルからの湧水は $0.1\text{L}/\text{min}$ 程度と考えられる。それでも、施工自体は問題なく実施できたため、この本検討結果に基づいて施工可能な湧水量を決定すれば、 $0.1\text{L}/\text{min}$ となる。他の施工法に関しては、同様の検討は実施していないため、比較することはできない。

さらに、湧水環境下でも施工することは可能であったが、止水することはできなかったため、施工中の湧水処理や施工後の仮止水による膨潤期間の設定など、施工以外の対策を検討する必要がある。膨潤期間の設定に関しては、後述する。

③ 湧水量 $Le > 0.001L/min$ の場合（回収可能性維持期間一定の場合）

【緩衝材の施工法以外の対策 1】：室内試験の結果から、水みちは緩衝材と非膨潤性材料の界面に収斂する可能性が高い。実際の処分施設では、処分孔や処分坑道の孔壁と緩衝材の界面に水みちが形成されるものと考えられる。このため、孔壁に人工的な不陸を設置するという対策が考えられる。これにより、膨潤後の緩衝材の表面に凹凸が形成されるため、緩衝材と地下水の接触面積が増加して緩衝材内部に浸潤する湧水量が増加する効果が期待できる。さらに、地下水圧が作用しても緩衝材の連続的な水みちが形成され難くなり、緩衝材近傍に拡散場を作り易くなるなどの効果も期待できる。

【不確実性】：人工的な不陸の効果に関しては、地下環境等において、施工性も含めた確認試験をする必要がある。形状や施工手順などについても課題がある。

【緩衝材の施工法以外の対策 2】：室内試験結果から、人工給水によって緩衝材を事前に膨潤させる対策が考えられる。給水量を制御した状態で膨潤（プレ膨潤）させ、湧水箇所や流出箇所をシールできれば、処分孔や処分坑道を拡散場とすることができる可能性がある。この場合、人工給水に伴う膨潤変形を拘束するためのコンパートメントプラグや端部プラグなどの緩衝材以外の対策も必要となる。

【不確実性】：緩衝材をプレ膨潤させる場合には、膨潤させるために供給する液性が影響することが試験により、示唆されている。また、隙間がある場合には、隙間の大きさや、湧水の位置、緩衝材の飽和状況等もプレ膨潤の効果には関わっており、効果的な対策とするために、環境を制御した施工が必要であると考えられる。地下水圧がほぼ全応力として緩衝材に作用し、その圧力によって発生する隙間によって破過現象が発生する可能性等もあり、さらに、その隙間が流出箇所と連通するような場合、湧水圧によって発生した隙間が亀裂などの流出孔と連通したら瞬時に水が流れるのと同時に水圧が下がり、隙間が塞がるという現象が繰り返されることも予想される。このため、プレ膨潤を効果的に行うためには、さらに緩衝材の界面近傍の特性を把握し、複合的な場でも効果的に施工する方法について検討しなければならない。

④ 塩水環境における仕様検討

【対策】：0.5mol/mol の NaCl 水溶液での室内試験の結果から、緩衝材の流出現象は、蒸留水の場合と概ね同様であったが、0.0001L/min(0.1cc/min)でも破過現象とシールが繰り返されており、塩水環境における許容される湧水量は明確にはなっていない。ただし、0.0001L/min(0.1cc/min)以下の流速を許容される湧水量とすることは現実的には厳しすぎるものと考えられるため、緩衝材だけで止水させるのではなく、閉鎖時期や許容流出量の考えなどから妥当な限界流速を決定する必要がある。

また、緩衝材流出によるケイ砂とベントナイトの分離傾向が著しく、水みちにケイ砂が沈殿する傾向がみられるため、緩衝材と孔壁の界面近傍はベントナイト単体とする、あるいは逆の発想で水みちとなるケイ砂を周囲に施工して、ベントナイトの流水による剝離を防ぐな

ども対策として考えられる。

【不確実性】：塩水環境下では、緩衝材流出材料が沈殿し易いため、流量の方向と流出位置の関係が重要となってくる。豎置き処分方式で、底面から方面に向かって湧水が流れるような場合では、緩衝材流出材料は沈殿して、処分孔から流出しない可能性が実験から示唆された。一方、横置き処分方式では、緩衝材流出材料が沈殿しても、流出位置によってはそのまま排出される可能性もある。さらに、他のイオンを含む地下水の影響等も把握する必要がある。

(6) 湧水量制御技術に関する文献調査

前述のように、緩衝材だけで止水性を担保する場合、許容される湧水量が厳しくなり、処分サイトの選択肢を著しく制限することになる。そこで、許容される緩衝材流出量を総流量と緩衝材流出量の関係から規定すると、その対策は、閉鎖までの時間の削減、流量の低減、緩衝材の乾燥質量の増加、に大別される。これらの対策の実施可能な時期は、施工段階ごとに異なり、その施工段階は掘削前、掘削中～緩衝材施工中、さらに緩衝材施工後に大別できる。掘削前の湧水対策に関しては、湧水量の少ないサイトの選定やグラウトや揚水による止水対策などが考えられる。

掘削中～緩衝材施工中における具体的な湧水対策は処分概念毎に異なるが、基本的には、湧水量を減らす対策と湧水による水みちの発生・緩衝材流出現象による緩衝材の流出を防ぐ対策、さらに許容される流出量を増やす対策に分けられる。

施工後の湧水対策に関しては、水みちの発生・緩衝材流出現象による緩衝材の流出を防ぐための対策として、処分孔の中を早期に拡散場にする対策が考えられる。

以上をまとめると表 4.3.1-1 と表 4.3.1-2 のようになる。表に挙げた各対策に関してはSKB社による先駆的な検討がなされている[23]が、我が国の岩盤とスウェーデンの岩盤の違いや緩衝材の材料の違い、さらには処分概念の違いなどから、これらの対策の有効性は、実験によって検証しなければならない。

表 4.3.1-1 処分施設の湧水対策一覧

施工法		掘削前	掘削中～緩衝材施工中 その対策	緩衝材施工後 その対策
M の増加 密度分布の低下		—	Q、q の低減	q、T の低減
縦置き	原位置 施工方式	サイト選定 グラウト	防水シート 凍結 ポストグラウト 隙間充填 ウォータータイト 揚水	早期埋戻し 処分孔の水封 処分孔仮プラグ 処分孔への人工給水
	吹付け/ ペレット 充填方式		プレグラウト ポストグラウト 区間閉鎖 ウォータータイト 自然流下	早期埋戻し 処分孔の水封 処分孔仮プラグ 処分孔への人工給水
横置き	PEM 方式		覆工 区間閉鎖 ペレット充填 ウォータータイト 自然流下	早期埋戻し 処分孔の水封 処分孔仮プラグ 処分孔への人工給水

表 4.3.1-2 現時点で考えられる影響低減対策の検討

時期	縦置き・ブロッ ク方式	横置き・原位置施工方 式	横置き・PEM 方 式
掘削前	プレグラウト		
掘削中	揚水	斜坑	
掘削後	ポストグラウト		
緩衝材施工中	遮水シート	裏面排水 段階的閉鎖 (ディスタンスブロッ ク・フィリングブロッ ク・コンパートメント プラグ)	— (地上施工)
廃棄体定置			裏面排水 段階的閉鎖 (ディスタンスブ ロック・フィリン グブロック・コン パートメントプラ グ)
処分孔閉鎖	仮処分坑端部プラグ 早期埋戻し/連絡坑の水没 処分坑への人工給水		
管理期間中 (回収可能性維持期間)	力学止水プラグ		

4.3.2 解析技術への反映

本検討結果から、再冠水中に発生する破過、水みちの発生、緩衝材流出の各現象の発生によって、再冠水後（長期性能評価の初期状態）では、必ずしも緩衝材は膨潤して均質な状態ではない可能性が示唆された。特に水みちの発生や緩衝材流出のような現象は、緩衝材自体の機能を損なう可能性があり、流速が速いと内部に地下水が浸潤する前に緩衝材流出によって表面の膨潤した緩衝材が洗い流されていく状況も観察できた。

この破過、水みちの発生、緩衝材流出の各現象を連続体力学の枠組みの中で取り扱うには、非常に高度な解析技術が要求される。例えば、破過現象は、水みちを膨潤によって塞いだ緩衝材が水圧によって押し抜きせん断される現象であり、緩衝材の膨潤に伴う強度や剛性の低下とせん断による破壊現象を取り扱えなければならない。水みちの発生現象では、複数の水みちが1つの大きな水みちに収斂しながら、水密の流速が増していくという現象を表現できなければならない。この水みちの収斂には、緩衝材の膨潤や沈殿物の堆積による不整によって生じる分岐現象が表現できる解析手法が必要となる。さらに、緩衝材流出現象では、連続体として場に存在していた固体が解析領域から流出するという現象を表現できる必要がある。

このため、緩衝材の流出に関しては当面、流出量を予測することにより、全体の緩衝材量、あるいは表面付近の密度低下の度合を予測し、許容される範囲に抑えるための前述のような対策を講じることが有効であると考えられる。

第4章 参考文献

- [1] Mattias Åkesson, Ola Kristensson, Lennart Börgesson, Ann Dueck: THM modelling of buffer, backfill and other system components, Critical processes and scenarios, SKB Technical Report TR-10-11 (2010).
- [2] Lennart Börgesson, Torbjörn Sandén : Piping and erosion in buffer and backfill materials Current knowledge, SKB Report R-06-80 (2006).
- [3] Torbjörn Sandén, Lennart Börgesson: Deep repository-engineered barrier system. Piping and erosion in tunnel backfill Laboratory tests to understand processes during early water uptake, SKB Report R-06-72 (2008).
- [4] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 25 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書 (第 2 分冊) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材, 2014
- [5] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書 (第 2 分冊) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材, 2015
- [6] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書 (第 2 分冊) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材, 2016
- [7] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書 (第 2 分冊) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材, 2017
- [8] 日本原子力研究開発機構：幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験－坑道の埋め戻し材に関する検討－, JAEA-Research2016-002 (2016)
- [9] 地盤工学会：単孔を利用した透水試験方法 JGS 1314-2012, 地盤調査の方法と解説 (2013)
- [10] 日本原子力研究開発機構：幌延深地層研究計画 平成 27 年度調査研究成果報告, JAEA-Review2016-022 (2016)
- [11] 地盤工学会：粘土鉱物判定のための試料調製方法 JGS 0251-2009, 地盤材料試験の方法と解説 (2010)
- [12] 小峯ほか：一次元模型実験によるベントナイト系緩衝材の自己シール性評価, 土木学会論文集 No.757/Ⅲ-66,101-112,2004.3. 2) 小峯秀雄：同一名称ベントナイトの産出年度による違いと膨潤特性理論評価式の適用性, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 平成 17 年 9 月
- [13] 日本工業規格：土の含水比試験方法 (JIS A 1203 : 2009) ,<http://kikakurui.com/a1/A1203-2009-01.html>、土粒子の密度試験方法 (JIS A 1202 : 2009) ,<http://kikakurui.com/a1/A1204-2009-01.html>、土の湿潤密度試験方法

(JIS A 1225 : 2009) ,<http://kikakurui.com/a1/A1225-2009-01.html>

- [14] Mattias Åkesson, Ola Kristensson, Lennart Börgesson, Ann Dueck: THM modelling of buffer, backfill and other system components, Critical processes and scenarios, SKB Technical Report TR-10-11 (2010).
- [15] Lennart Börgesson, Torbjörn Sandén : Piping and erosion in buffer and backfill materials Current knowledge, SKB Report R-06-80 (2006).
- [16] Torbjörn Sandén, Lennart Börgesson: Deep repository-engineered barrier system. Piping and erosion in tunnel backfill Laboratory tests to understand processes during early water uptake, SKB Report R-06-72 (2008).
- [17] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 25 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書（第 2 分冊）人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材，2014
- [18] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書（第 2 分冊）人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材，2015
- [19] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書（第 2 分冊）人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材，2016
- [20] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書（第 2 分冊）人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材，2017
- [21] 小峯ほか：一次元模型実験によるベントナイト系緩衝材の自己シール性評価，土木学会論文集 No.757／Ⅲ-66,101-112,2004.3. 2) 小峯秀雄：同一名称ベントナイトの産出年度による違いと膨潤特性理論評価式の適用性，土木学会第 60 回年次学術講演会，平成 17 年 9 月
- [22] 小林一三，戸井田克，笹倉剛，太田秀樹：等含水比線と等飽和度線を用いた締固めベントナイトの圧縮・膨潤挙動の解釈，土木学会論文集 C，Vol. 63，No.4，pp.1065-1078 (2007).
- [23] Åkesson M, Börgesson L, Kristensson O, 2010. SR-Site Data report. THM modelling of the buffer, backfill and other system components. SKB TR-10-14, Svensk Kärnbränslehantering AB.

第5章 再冠水時の緩衝材挙動のモデル化・解析に関わる検討

5.1 湧水量の解析的評価方法の検討

5.1.1 研究の概要

(1) 研究の背景

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設において、緩衝材の定置時の岩盤からの湧水によって緩衝材の施工品質に影響を与える可能性が懸念されている。また、緩衝材定置後の再冠水期間においては、処分孔への地下水の流入により緩衝材の流出が生じる可能性があり、緩衝材の密度がこれによって減少し、緩衝材が持つべき機能が低下することが懸念されている（原環センター、2015）[1]。そのため、処分坑道および処分孔への湧水量の評価、湧水対策の効果、および施工過程による湧水量の変化の評価は、緩衝材の機能を守るために必要な評価である。

また、NUMOは処分孔への湧水に対しては、必要に応じて処分孔ごとに湧水対策を行うことを検討している。具体的な対策例として、処分孔内への湧水を処分孔底部に設けた湧水貯留槽に集水し、緩衝材が湧水に直接接しないような構造とするほか、処分孔への湧水の流入を低減させる工学的対策としてグラウト等の工法の適用が検討されている[3]。このグラウトによる湧水量低減対策は、周辺岩盤の水理特性により効果の程度が影響を受けることが想定される。特に割れ目が主要な水みちとなっていることが懸念されるような岩盤においては、割れ目をモデル化した水理モデルによりその効果を評価する必要がある。

(2) 研究の目的

本研究は、高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る工学技術として、処分場の操業期間中における人工バリアに用いる緩衝材の品質を評価するため、緩衝材の品質評価に影響を与える可能性のある処分孔への地下水流入量と工学的対策工の効果の評価する技術を確立することを目的とする（岩谷ら、2016）[2]。

昨年度までの研究において、幌延深地層研究センター（以下、幌延 URL）350m 坑道の公開された水理データをもとに作成した、複数坑道を設定した「割れ目ネットワークモデル」を用いて、処分孔の湧水への止水対策の感度解析を実施し、グラウトによる止水効果や周辺坑道、周辺孔の湧水量に与える影響、グラウト施工手順を考慮した処分孔の湧水量の変化について評価することができた。さらに緩衝材の定置後の処分孔への湧水量についての予備的な検討も実施した。

本年度は、周辺処分坑道の埋戻しが処分孔の湧水量に与える影響について、昨年度までに構築した複数坑道を設定した「割れ目ネットワークモデル」を用いて評価を行い、埋戻しの順序の違いによる処分孔の湧水量の変化を算定することで、操業中のパネルの処分坑道を適切に埋戻す手順に資する知見を得ることを目的とする。並びに、緩衝材の定置後の処分孔への流入量について、処分孔周辺に EDZ をモデル化することによって、定置後に処分孔を通過する地下水の流量や水圧分布を算定する。それにより処分孔周辺の地下水の水理挙動を把握することを目的とする。

(3) 全体研究計画

前記の目的を達成するため、平成 26 年度から 4 年間の長期計画を策定した。今年度（平成 29 年度）はその 4 年目に該当する。長期計画は、大まかに処分坑道の埋戻し前の検討と埋戻し後の検討に分けられる。実施項目を箇条書きにして以下にまとめる（図 5.1.1-1）。

● 緩衝材設置時の処分孔への地下水流入と工学的対策

平成 26 年度

- ① 幌延の水理地質データに基づく割れ目ネットワークモデルの構築
- ② 処分孔及び処分坑道への湧水量の算定
- ③ 止水対策による湧水量低減効果の評価

平成 27 年度

- ① 実測湧水量に合致する水理モデル、境界条件の設定
- ② 周辺間隙水圧の違い等による湧水量、止水対策の感度解析

平成 28 年度

- ① 処分パネルを想定した複数の処分坑道のモデル化による湧水量変化の評価
- ② 施工順序を考慮した湧水量変化の評価

● 緩衝材定置・埋戻し後の処分孔への地下水流入

平成 29 年度

- ① 周辺坑道の埋戻しが処分孔湧水量に与える影響の評価
- ② 定置後の処分孔周辺の地下水流動の評価

前段の埋戻し前の検討においては、坑道や処分孔への湧水が緩衝材定置の妨げになることから、このときの掘削に伴う湧水量と湧水量低減対策の効果を解析的に検討した。初年度（平成 26 年度）の検討として、割れ目ネットワークを考慮したモデル化とそのモデルを用いた浸透流解析を行い、割れ目ネットワークモデルによる検討の有効性を確認した。また、2 年目（平成 27 年度）においては、一般的な地下環境および幌延深地層研究センター（以下、幌延 URL）350m 坑道の公開された水理データに基づき、当該モデルを用いた浸透流解析から処分坑道の湧水量に合致する 3 次元水理地質構造モデルを構築した。さらに、このモデルを用いて、処分孔の湧水への止水対策の感度解析を実施し、グラウトによる止水効果や周辺の処分坑道、周辺の処分孔の湧水量に与える影響、周辺の処分坑道の掘削が湧水量へ与える影響を評価した。この結果、割れ目を水みちとする地下水流動や湧水等の特徴的な分布を表現できたことから、処分孔の湧水量、及び止水対策が処分孔と処分坑道周辺の水理場に与える影響を評価するうえで、「割れ目ネットワークモデル」を用いた解析的検討が有効であることを示した。3 年目（平成 28 年度）の検討では、処分場レイアウトを想定し、坑道掘削の進展に伴う湧水量変化と止水対策の効果についての解析を行った。

最終年度の 4 年目には、後段の埋戻し後の検討について実施する。まずは周辺の処分坑道の埋戻し、緩衝材の定置による処分孔湧水量への影響を評価する。また、緩衝材定置後の再冠水期間においては、処分坑道内の埋戻し材や処分孔内の緩衝材内へ地下水が流入し、水みち形成(パイピング)や浸食(エロージョン)が生じる可能性がある。これらの現象はベントナイトの自己修復作用

を妨げ、長期性能に影響を与えることが考えられるため、この期間における処分孔の湧水量とその周辺の水理挙動について解析的に検討する。この検討により、割れ目が支配的な流動場における処分孔の湧水量について評価を行う。

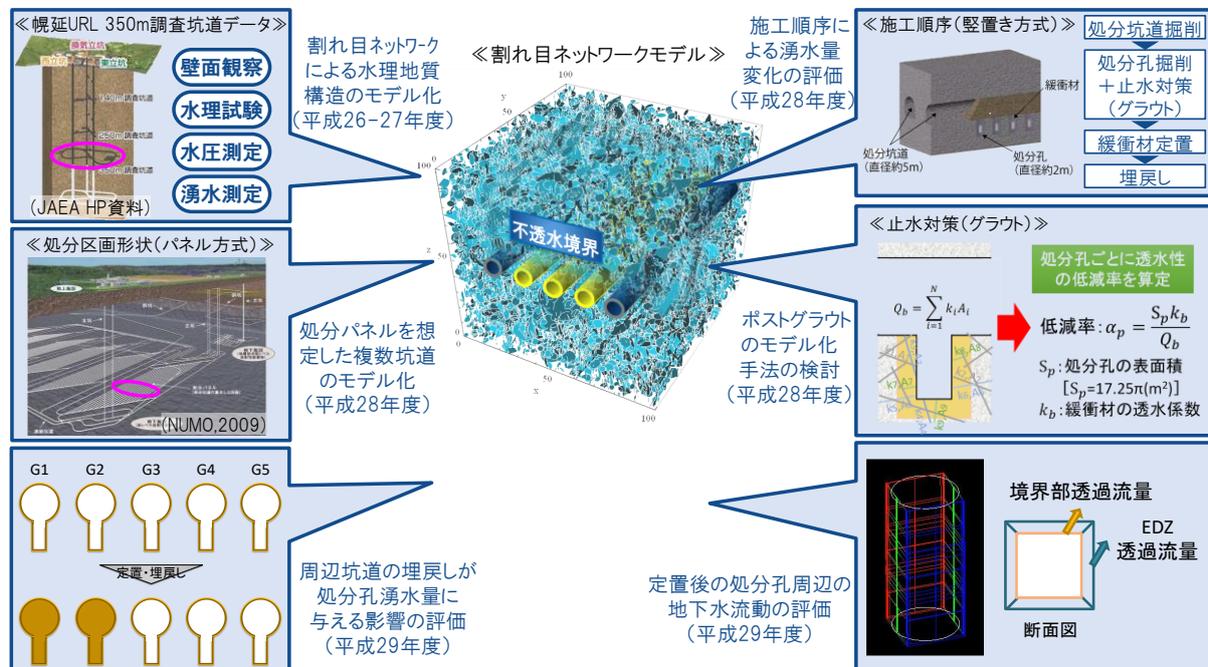


図 5.1.1-1 割れ目ネットワークモデルを用いた検討概要

(4) 本年度の検討概要

昨年度までの検討を踏まえ、本年度は、周辺の処分坑道の埋戻しが処分孔の湧水量に与える影響について検討を行った。さらに緩衝材定置後の処分孔への影響について検討した(図 5.1.1-2)。

1) 周辺坑道の埋戻しが処分孔湧水量に与える影響の評価

周辺坑道の埋戻しが処分孔湧水量に与える影響の評価は次の手順にて行った。

- ① 昨年度作成した複数の処分坑道を考慮した3次元の割れ目ネットワークモデル(10リアライゼーション)を基本とし、隣接坑道の埋戻しや処分孔へ緩衝材定置を想定したモデル化を行う。
- ② 埋戻しの施工順序を想定して隣接坑道の処分孔の緩衝材定置が完了した場合、緩衝材定置後処分坑道が埋戻された場合、それぞれについて解析ケースを設定する。各解析ケースで、①で作成した解析モデルに基づき浸透流解析を行い、隣接坑道の埋め戻しや処分孔への緩衝材の定置が処分坑道及び処分孔の湧水量へ与える影響についての検討を行う。また、埋戻し前の解析結果との比較を行い埋戻しの手順が湧水量の変化に与える影響を評価する。

2) 定置後の処分孔周辺の地下水流動の評価

定置後の処分孔周辺の地下水流動の評価は次の手順で行った。

- ① 昨年度作成した複数の処分坑道を考慮した3次元の割れ目ネットワークモデルのうち、処分

坑道 1 本で 10 か所の処分孔を設定したモデルの 1 リアライゼーションを基本とし、処分孔周辺に EDZ をモデル化した水理モデルを作成する。

- ② ①で作成したモデルを用い、処分孔に緩衝材が定置された後の EDZ や処分孔を通過する地下水の流量や水圧分布を算定する。緩衝材の膨潤過程を考慮したモデル化を行うことで、緩衝材定置後の処分孔周辺の地下水挙動の評価を行う。

各年度の解析イメージ図

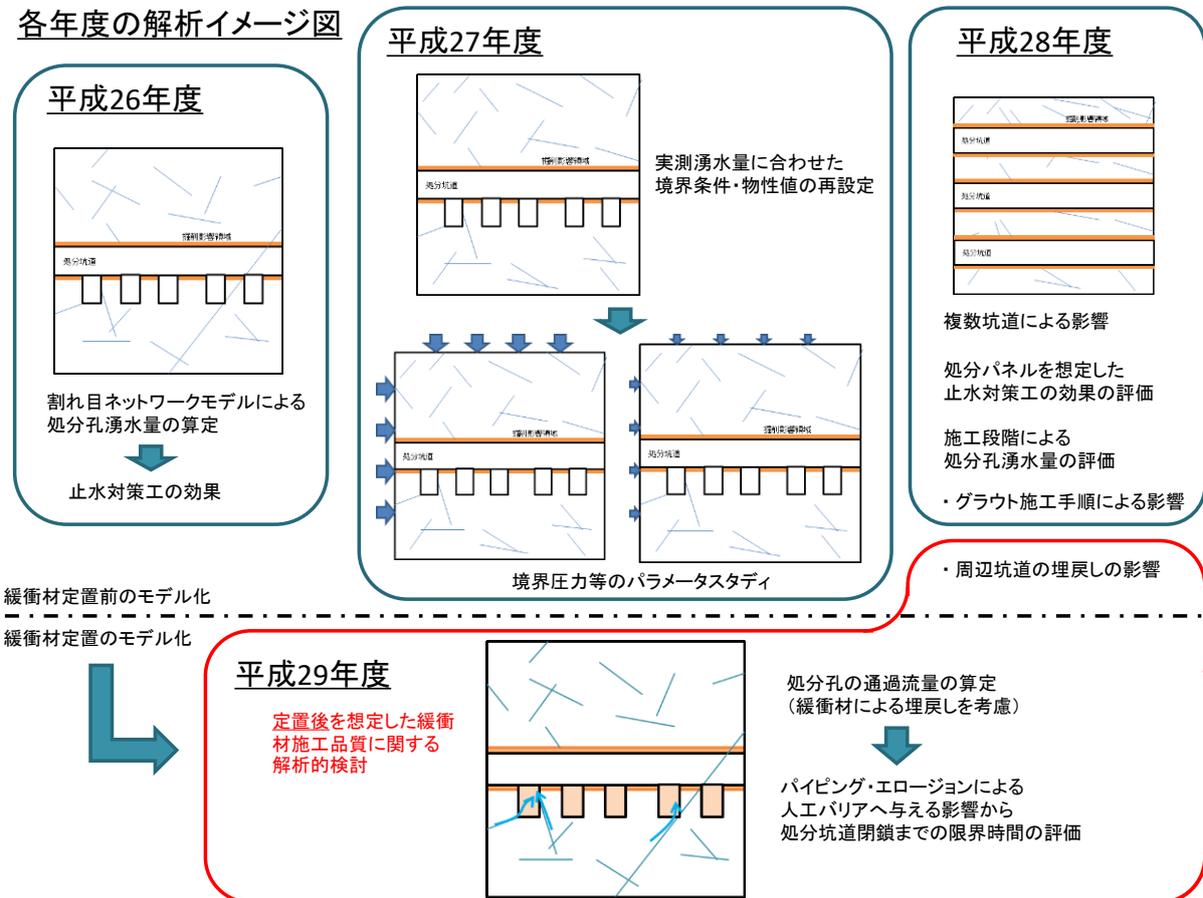


図 5.1.1-2 各年度の検討の概念図

5.1.2 周辺坑道の埋戻しが処分孔湧水量に与える影響の評価

(1) 検討方針

現計画において、縦置き・ブロック方式（パネル型）では、図 5.1.2-1 のように緩衝材の定置が完了した処分坑道から埋め戻しを行うことを想定している。ただし、処分坑道を埋め戻した際には、水位が回復することにより隣接する坑道および処分孔では、湧水が増える可能性がある。そこで、埋戻しに伴う隣接坑道および処分孔の湧水挙動について、岩盤の割れ目を考慮した地下水浸透シミュレーションにより評価する。

本検討では、平成 27 年度の検討において作成し、平成 28 年度の検討において修正した処分坑道 5 本の水理地質構造モデルに対して、掘削後の施工順序（処分坑道の埋戻し、処分孔への定置）を考慮可能なモデル化を行う。このモデルを用いて浸透流解析を実施し、処分坑道及び処分孔へ

の湧水量を算定した。

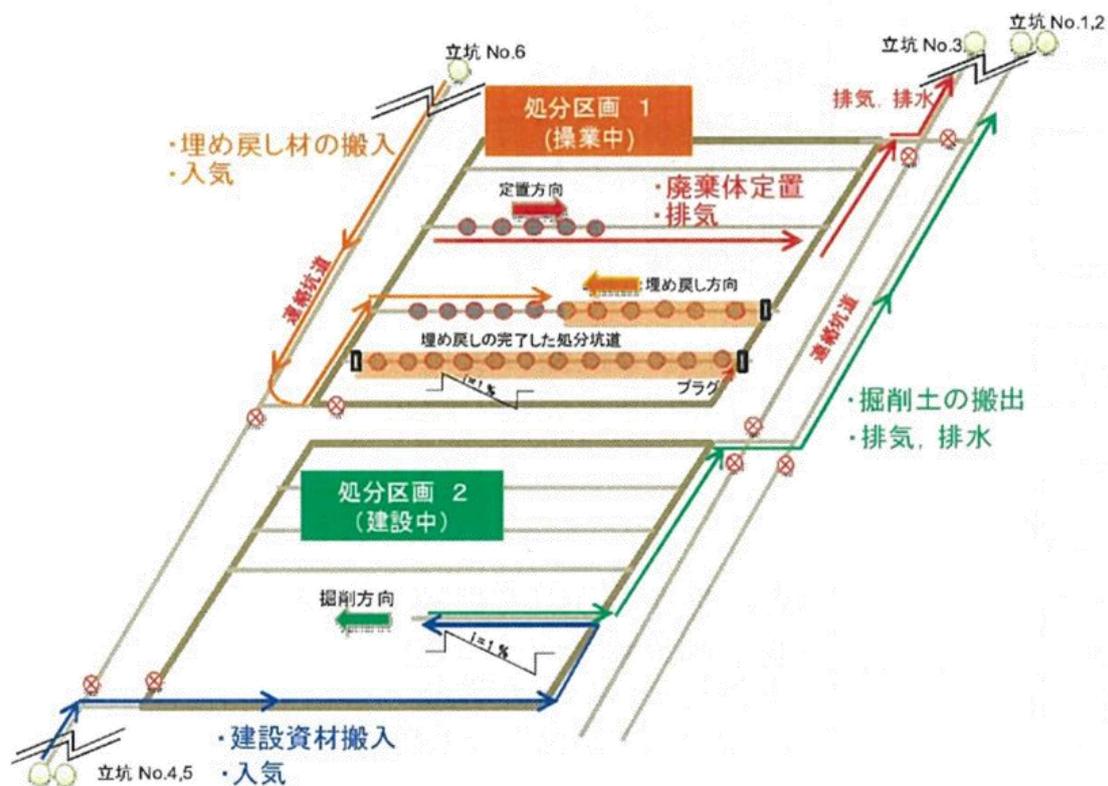


図 5.1.2-1 パネル方式における処分場建設および操業の基本イメージ (NUMO、2016) [3]

(2) 解析モデル及び解析条件

1) 割れ目の幾何学パラメータ

本検討では、平成 27 年度に構築した割れ目ネットワークモデルを基本としている。作成したモデルは、一般的な地下環境および幌延深地層研究センター（以下、幌延 URL）を対象としており、対象とする地質は地層処分の候補母岩の一つである新第三紀堆積岩とした。割れ目の幾何学的パラメータは、幌延の深度 350m に位置する坑道のうち、ほぼ同じ長さで互いに直交する西連絡坑道（N60E 方向：50.62m）と東連絡坑道（N30E 方向：55.95m）で得られた調査データを整理し設定した。表 5.1.2-1 に割れ目の幾何学的パラメータセットを示す。

a 割れ目の方向分布

割れ目の方向分布を表現するパラメータは、全 928 本の割れ目を NW 系、NE 系、その他に 3 区分し、それぞれを Fisher 分布に当てはめて、卓越方向（表 5.1.2-1 では、走向傾斜表示として表記）とフィッシャー分布係数（表 5.1.2-1 では、Fisher 定数と表記）を推定した。割れ目の長さ分布を表現するパラメータは、幌延サイトにおける既存文献を参考にした平成 26 年度の検討成果[1]に基づいて、べき乗数分布を 3.5、最小半径を 3.82m と設定した。

b 割れ目の密度

割れ目の密度を表現するパラメータは、西連絡坑道と東連絡坑道のそれぞれに設定された3本のスキャンライン（左、天盤中心、右）から、各割れ目セット（NW系、NE系、その他）について単位長さあたりの割れ目頻度 P10（本/m）を求め、その割れ目セットの卓越方向を考慮した補正係数 C13 を（鈴木ら、2009）[12]を参考に計算し、両者を掛け合わせて、三次元割れ目密度 P32（ m^2/m^3 ）を計算した。なお、割れ目の卓越方向とスキャンラインのなす角によって補正係数 C13 が異なるため、各割れ目セットについて、西連絡坑道と東連絡坑道のそれぞれから P32 が計算される。そこで、ここではこれにそれぞれの坑道の長さを重み付けして、各割れ目セットの P32 を計算した。

さらに、平成 26 年度と同様に基質部のモデル化のために、計算された P32 の最小半径が 3.82m と考え、べき乗数 3.5 のべき分布に従い、最小半径が 1.25m のときの P32（元の値と区別するため以降 P32adj と記す）を計算し、表 5.1.2-1 に併記した。

以上の通り設定したパラメータセットに基づき、100m 四方の領域に割れ目を確率的に発生させた。図 5.1.2-2 に設定したパラメータに基づき作成した割れ目ネットワークモデルの例を示す。

表 5.1.2-1 割れ目の幾何学的パラメータセット

割れ目のセット	割れ目の方向分布			割れ目の長さ分布		割れ目の密度			
	走向傾斜表示		Fisher定数	べき乗数	最小半径 (m)	P32 (m^2/m^3)	P32adj (m^2/m^3)		
NW	N	68.9	W 52.2	N	16.9	3.5	3.82	0.54	0.94
NE	N	50.9	E 50.5	N	13.6	3.5	3.82	0.25	0.44
Others	N	77.7	E 42.7	S	5.2	3.5	3.82	0.20	0.34
合計								0.98	1.71

※P32adj：最小半径を 1.25m（基質を割れ目で表現）に延長した場合の値

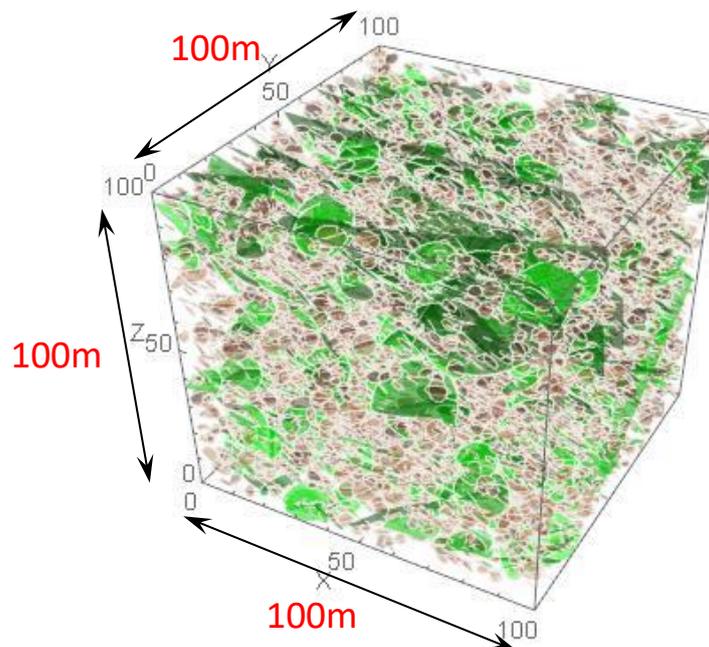


図 5.1.2-2 割れ目ネットワークモデルの例

2) 透水性・境界条件の設定

透水性の設定方法は、平成 27 年度および平成 28 年度における設定方法と同様である。表 5.1.2-2 にモデル作成に用いたパラメータセットを示す。

a 透水性割れ目の割合

モデルに配置する割れ目に対する透水性割れ目の割合は、割れ目の幾何学パラメータの設定に用いた、幌延の深度 350m に位置する西連絡坑道および東連絡坑道の坑壁において観測した割れ目において、湧水等が認められた割れ目の割合である 22.2% に設定した。そして、すべての割れ目の割れ目密度 ($P32=1.71 \text{ m}^2/\text{m}^3$) に対し、透水性割れ目の割合を乗じた透水性割れ目の密度 ($P32_{\text{hydro}}=0.38 \text{ m}^2/\text{m}^3$) を算定し、水理地質構造モデル中に作成する割れ目の量を規定した。なお、割れ目セットによる違いが比較的小さいため、割れ目セットごとに透水割れ目比率を与えるのではなく、その平均値を一様に与える方法とした。

b 透水係数

透水係数に関しては、換気立坑近傍の PB-V01 孔で実施された水理試験の結果を用いて設定した。割れ目を含む区間の透水係数は、4 地点での試験で得られた透水係数の対数平均値である $6.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ を設定値とした。

また基質部の透水係数についても、PB-V01 孔で実施された水理試験の結果を用いて、割れ目がほとんど無い区間を対象に実施された 2 地点での試験で得られた透水係数の対数平均値である $1.8 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ を設定値とした。

EDZ の透水係数については、日本原子力研究開発機構の調査データ中の記述に基づき、 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ と設定した。

c 境界条件

境界条件についても、平成 27 年度および平成 28 年度における設定条件と同様とした。日本原子力研究開発機構の調査データ[8]に基づき、解析モデルの x-y 方向、x-z 方向の境界部の境界条件を、深度相当の水圧（350m 水頭）に固定した。また、処分坑道軸に垂直な y-z 軸方向の境界条件は不透水境界とした。図 5.1.2-3 水理地質構造モデルの透水係数と境界条件の概念図に作成した水理地質構造モデルの透水係数と境界条件の概念図を示す。

表 5.1.2-2 水理モデル作成のためのパラメータセット

パラメータ	設定値
透水性割れ目の割合、割れ目密度 (P32hydro)	22.2 %、 $P32hydro=1.71 \times 0.222=0.38 \text{ (m}^2/\text{m}^3)$
割れ目を含む区間の透水係数	$6.0 \times 10^{-9} \text{ (m/s)}$
基質部透水係数	$1.8 \times 10^{-11} \text{ (m/s)}$
EDZ 透水係数	$1.0 \times 10^{-6} \text{ (m/s)}$

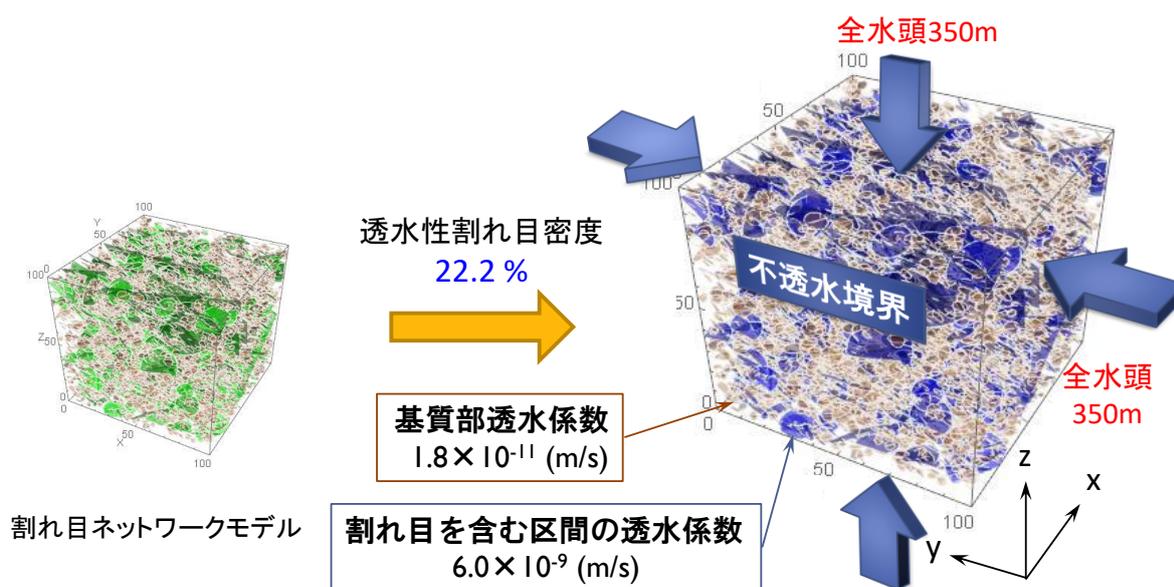


図 5.1.2-3 水理地質構造モデルの透水係数と境界条件の概念図

3) 処分坑道、掘削影響領域、処分孔のモデル化

処分坑道、掘削影響領域および処分孔のモデル化方法について述べる。本検討では、平成 28 年度に構築した水理地質構造モデルを使用している。平成 28 年度の検討では、平成 27 年度に作成した水理地質構造モデルの中に合計 5 本の処分坑道をモデル化している。また、各処分坑道には、平成 27 年度の検討でモデル化した掘削影響領域（以下 EDZ とする）を設定した。さらに、それぞれの処分坑道に対して、処分孔を各 10 箇所ずつモデル化した。以下に、具体的な設定条件を示す。

● 処分坑道のモデル化

処分坑道は、直径 5m の円柱構造とし、坑道延長を x 軸方向（東西方向）に 100m とした。また、処分坑道の本数を 5 本（G1～G5）とし、y 軸方向に 12m 間隔（端部の処分坑道の x-z 境界からの距離は 23.5m）で配置した。なお、処分坑道を設定した領域に存在するパイプは除去し、処分坑道内の境界条件を大気圧境界（全水頭 0m）として処分坑道を再現した。図 5.1.2-4 に複数処分坑道モデルの概要を示す。

● 処分坑道周辺の EDZ のモデル化

処分坑道周辺の EDZ の幅については、平成 27 年度の検討結果から、坑道周辺に 0.5m の均一厚さで分布すると設定した。また、EDZ は、坑道の周囲に放射方向・円周方向・坑道軸方向の格子状のパイプを追加することでモデル化を行った。図 5.1.2-5 にモデル化した処分坑道と EDZ を示す。

● 処分孔のモデル化

処分孔は、直径 3.0m の円柱構造とし、処分孔の高さは 5.0m とした。また、処分孔の本数を各処分坑道でそれぞれ 10 箇所（処分孔 01～処分孔 10）とし、処分孔間の離間距離を 6.6m（端部の処分孔中心位置と y-z 境界からの距離は 20.3m）として配置した。なお、処分孔設置領域に位置するパイプを大気圧境界に設定することで、処分孔が掘削された状態を再現した。

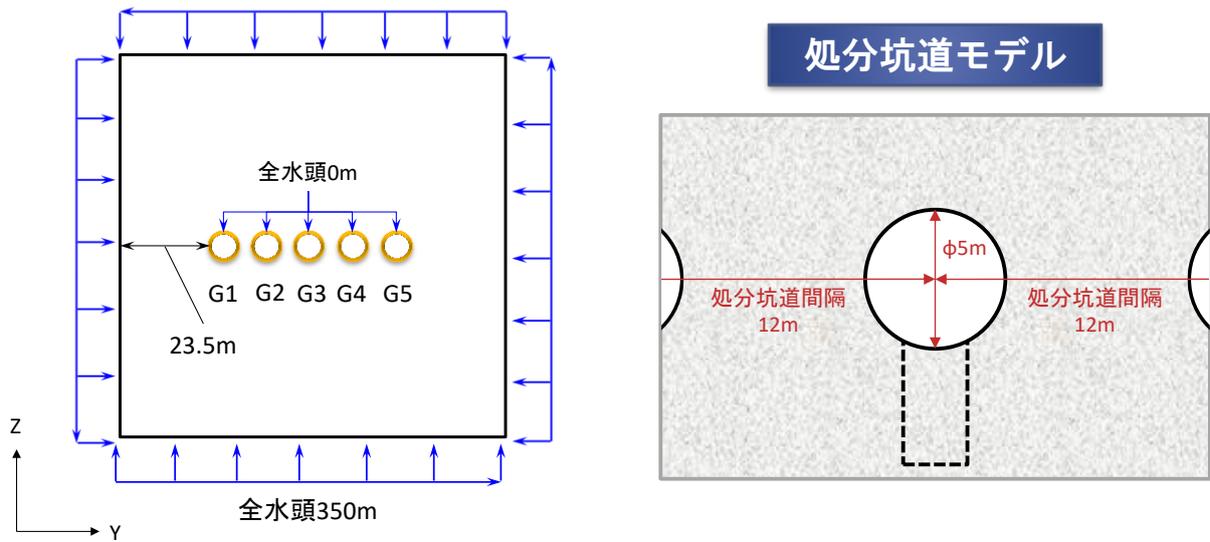


図 5.1.2-4 複数坑道モデルの概要

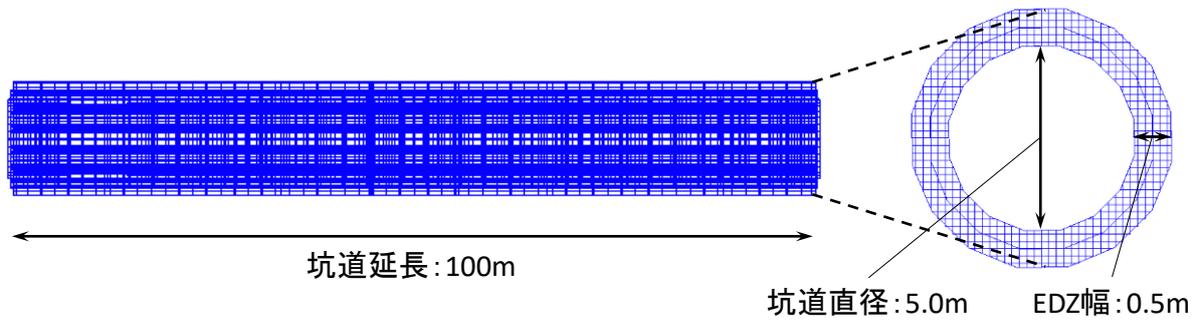


図 5.1.2-5 処分坑道および EDZ のモデル化の概要

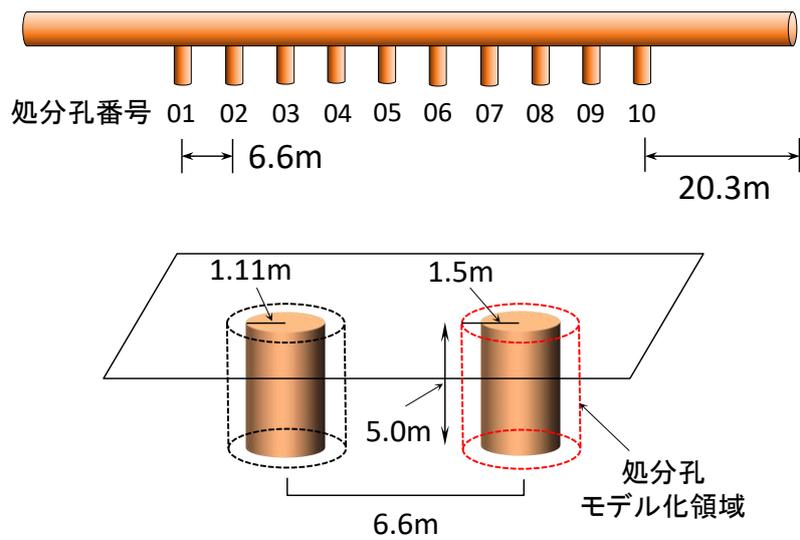


図 5.1.2-6 処分孔のモデル化の概要

4) 緩衝材定置・処分坑道埋戻しのモデル化

1)～3)において構築した水理地質構造モデルに対して、緩衝材の定置と処分坑道の埋戻しの状況をモデル化した。モデル化の方法は、NUMOにより得られる情報[3]を踏まえて設定した。

● 緩衝材に係る情報の整理

まず、緩衝材の設定条件に関わる情報を整理する。NUMO[3]の資料によると、緩衝材の品質に関する安全機能のうち、「収着による放射性物質の移行の遅延」の確保に必要な設計要件の一つとして「低透水性」が設定されている。また、低透水性の確認方法としては、緩衝材中の放射性物質の移行が拡散によって支配されるように、緩衝材の密度を設定することとしている。緩衝材の透水性については、次式で表されるペクレ数 $P_e(-)$ を指標として評価される。

$$P_e = \frac{k i L}{D_e}$$

ここで、 k (m/s)は透水係数、 i (-)は動水勾配、 L (m)は地下水流れに対する物体の代表長さ（ここでは緩衝材厚さ）、 D_e (m²/s)は実効拡散係数である。ペクレ数が1より十分小さい場合は、上式の右辺分子の移流効果よりも分母の拡散効果の方が大きくなり、緩衝材中の核種の移行は拡散によるものが支配的になり、低透水性が確保されると判断できるとしている。

NUMO[3]では、動水勾配を $i=0.05$ 、実効拡散係数を $D_e=1.0 \times 10^{-10}$ m²/s として、透水係数をパラメータに緩衝材厚さとペクレ数の関係について整理している。図 5.1.2-7 に示す結果から、ペクレ数は緩衝材厚さによる影響は小さく、緩衝材の透水係数で決まっていることが分かる。ここでは、拡散支配の十分性から $P_e \leq 0.1$ を低透水性の判断基準とし、透水係数が 1.0×10^{-10} m/s 程度以下であれば要件を満足するとしている。

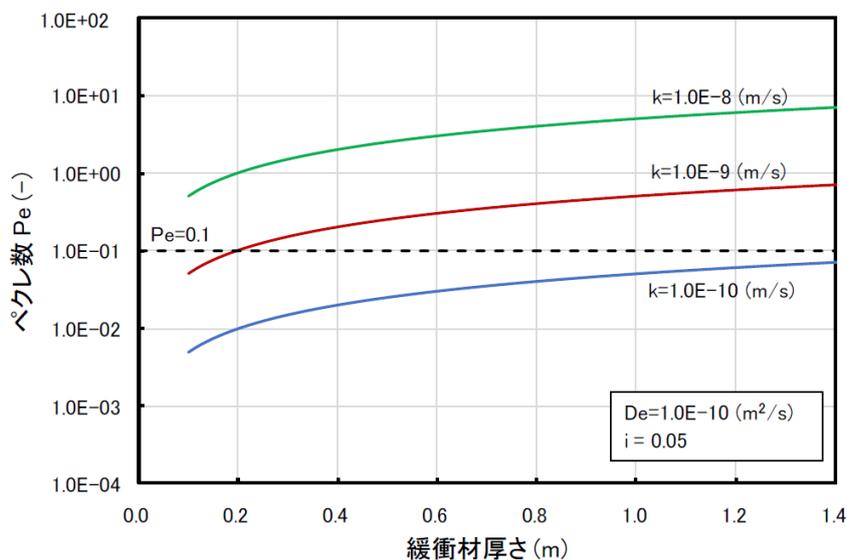


図 5.1.2-7 緩衝材厚さに対するペクレ数の概算結果[3]

● 埋戻し材に係る情報の整理

埋戻し材の設定条件に関わる情報を整理する。NUMO[3]の資料によると、埋戻し材の安全機能として、放射性物質の移行経路となるような地下水の流れを抑制すること、再冠水後の緩衝材や止水プラグ（粘土プラグ）の坑道への膨出を抑制することとしており、これらの安全機能を確保するのに必要な設計要件の一つとして「低透水性」が設定されている。また、低透水性の確認方法としては、坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないように、埋め戻し材の密度を設定することとしている。

NUMO[3]では、埋戻し材の透水係数をパラメータとしたEDZを含む坑道断面の地下水通過流量の感度解析を実施している。ここでは、母岩の透水係数を 1.0×10^{-8} m/sと設定している。その結果を図5.1.2-8に示す。解析を実施した埋め戻し材の透水係数の範囲において、地下水通過流量は2極化しており、埋戻し材の透水係数を母岩の透水係数の10倍の 1.0×10^{-7} m/s以下とすれば、埋め戻しの「低透水性」の観点からは性能に差が生じないとしている。それを踏まえて、基準となる透水係数を保守的に 1.0×10^{-8} m/s（検討時に設定した母岩の透水係数相当）と設定している。

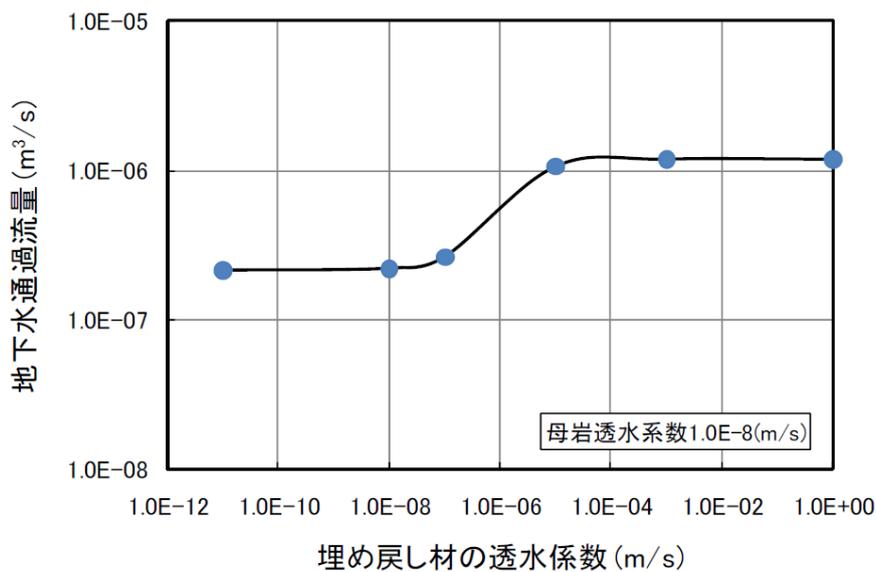


図 5.1.2-8 坑道の地下水通過流量と埋め戻し材透水係数の関係

また、緩衝材および埋戻し材ともに、設計要件の一つとして「低透水性」が設定されている。緩衝材では物質の移行が拡散によって支配されること、埋戻し材では地下水流動を極力抑制することを前提として、基準となる透水係数の設定を行っていることから、緩衝材や埋戻し材の透水係数は上記の要件を満たすような小さい値を設定することが適切である。処分孔および処分坑道を不透水境界に設定することは、緩衝材や埋戻し材に対して設計上の透水係数を与えるよりも周辺の地下水流動へ与える影響が大きいと推測されるため、保守的な設定であると考えられる。以上より、本研究では処分坑道の埋戻し、処分孔への緩衝材定置とともに、不透水境界としてモデル化することとした。図5.1.2-9に処分坑道の埋戻し、処分孔への緩衝材定置のモデル化方法の概要を示す。

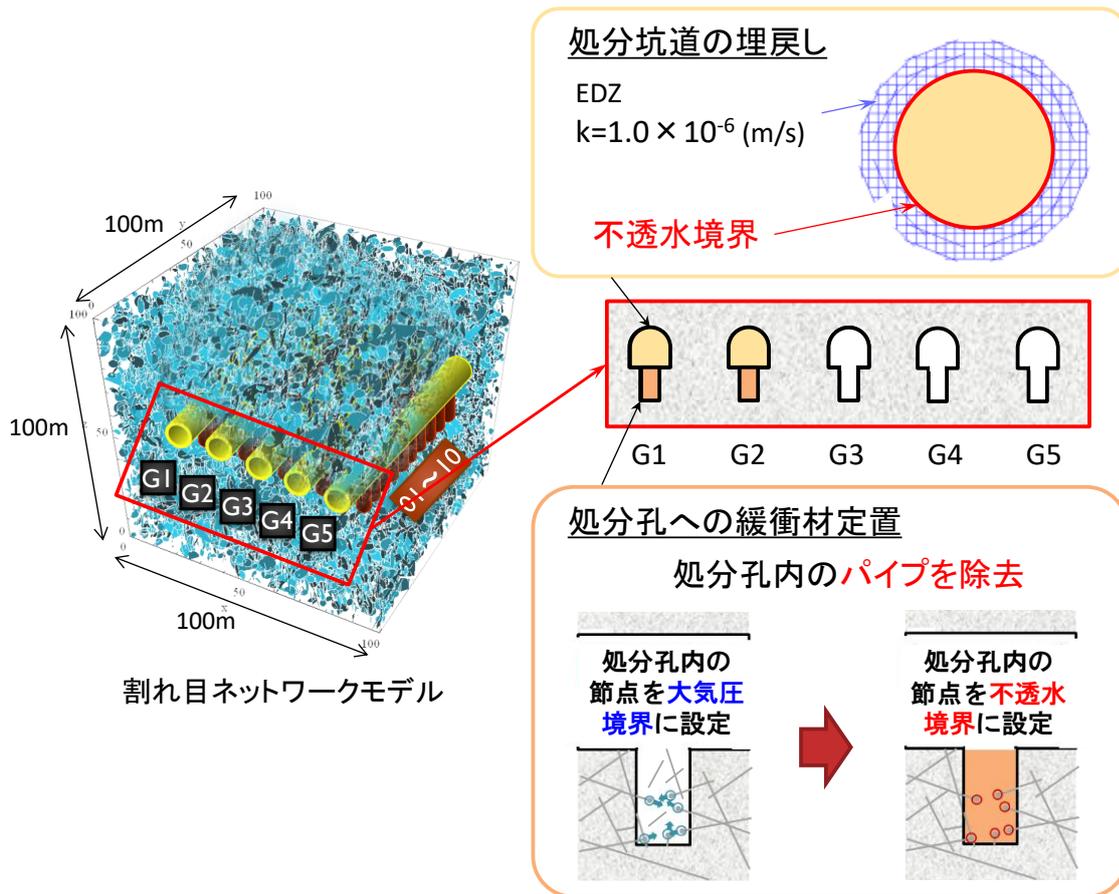


図 5.1.2-9 処分坑道の埋戻し、処分孔への緩衝材定置のモデル化方法の概要

(3) 周辺坑道の埋戻しに関する検討

1) 施工条件の設定

本検討では、平成 28 年度に作成した複数坑道の水理地質構造モデル (10 リアライゼーション) に対して、緩衝材の定置、また処分坑道の埋戻しを行うことによる、周辺坑道の処分坑道湧水量および処分孔湧水量への影響を検討する。

処分坑道の埋戻しは、緩衝材の定置が完了した坑道から実施することを想定している。ただし、処分孔掘削後の処分孔および処分坑道の状況は、その施工順序の違いにより異なることが考えられる。図 5.1.2-10 に処分孔掘削後の施工順序の違いによる処分孔および処分坑道の状況を示す。一つは、緩衝材の定置と処分坑道の埋戻しが処分区画単位で行われる状況を想定したものである。この場合は、埋戻しに先行して緩衝材の定置を行う順序 (施工順序 A) となり、処分孔はいずれも塞がった状態、処分坑道はいずれも空いた状態となることが考えられる。二つ目は、定置と埋戻しが処分坑道単位で行われる状況を想定したものである。この場合は、緩衝材の定置後、次の坑道の定置を行う前に埋戻しを行う順序 (施工順序 B) となり、処分孔と処分坑道がともに塞がっている状態となることが考えられる。

以上を踏まえて、以下の施工条件を設定する。

- ① 処分孔掘削後 (定置・埋戻しを実施していない) 条件
- ② 緩衝材の定置を先行して行う条件 (施工順序 A)
- ③ 緩衝材の定置後直ちに埋戻しを実施する条件 (施工順序 B)

また、施工段階として、図 5.1.2-10 の青点線で囲まれた G1、G2 の処分坑道に関して以下の条件を設定する。

- ① G1 処分坑道のみ施工が完了している条件
- ② G1 および G2 処分坑道まで施工が完了している条件

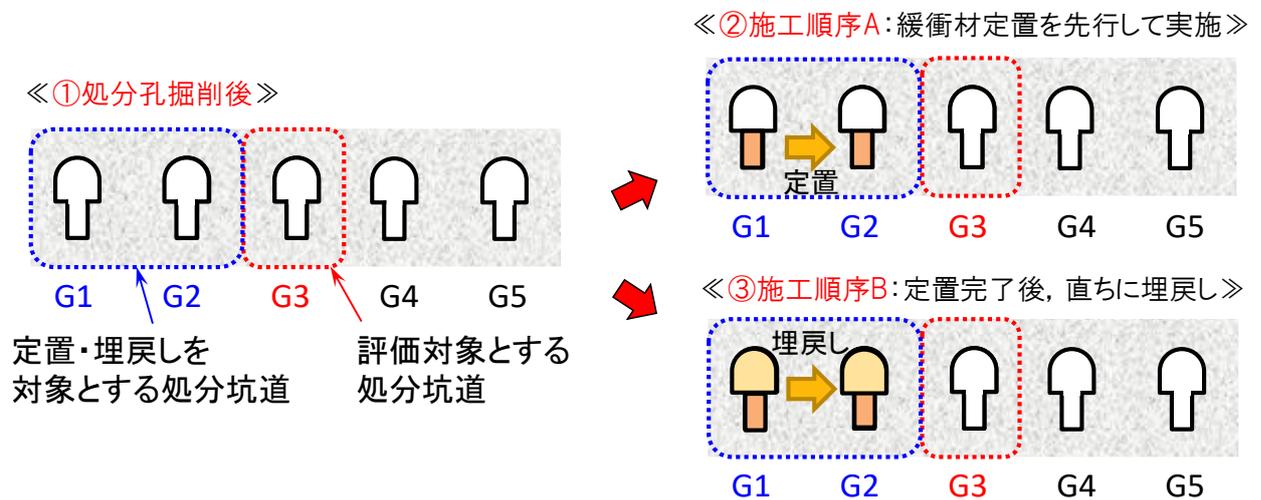


図 5.1.2-10 処分孔掘削後の施工順序の違いによる処分孔および処分坑道の状況

2) 解析ケースの設定

1)を踏まえて以下の 5 つの解析ケースを設定する。

- ① Case_Initial : 処分孔掘削後
- ② Case_A1 : 施工順序 A において、G1 処分坑道まで施工が完了した状態
- ③ Case_A2 : 施工順序 A において、G2 処分坑道まで施工が完了した状態
- ④ Case_B1 : 施工順序 B において、G1 処分坑道まで施工が完了した状態
- ⑤ Case_B2 : 施工順序 B において、G2 処分坑道まで施工が完了した状態

各解析ケースにおける施工状況を図 5.1.2-11 に示す。上記の 5 つのケースについて、10 リアライゼーションで G3 処分坑道湧水量および G3 の処分孔湧水量を算定した。また、参考として G2 および G4 処分坑道についても算定を行った。

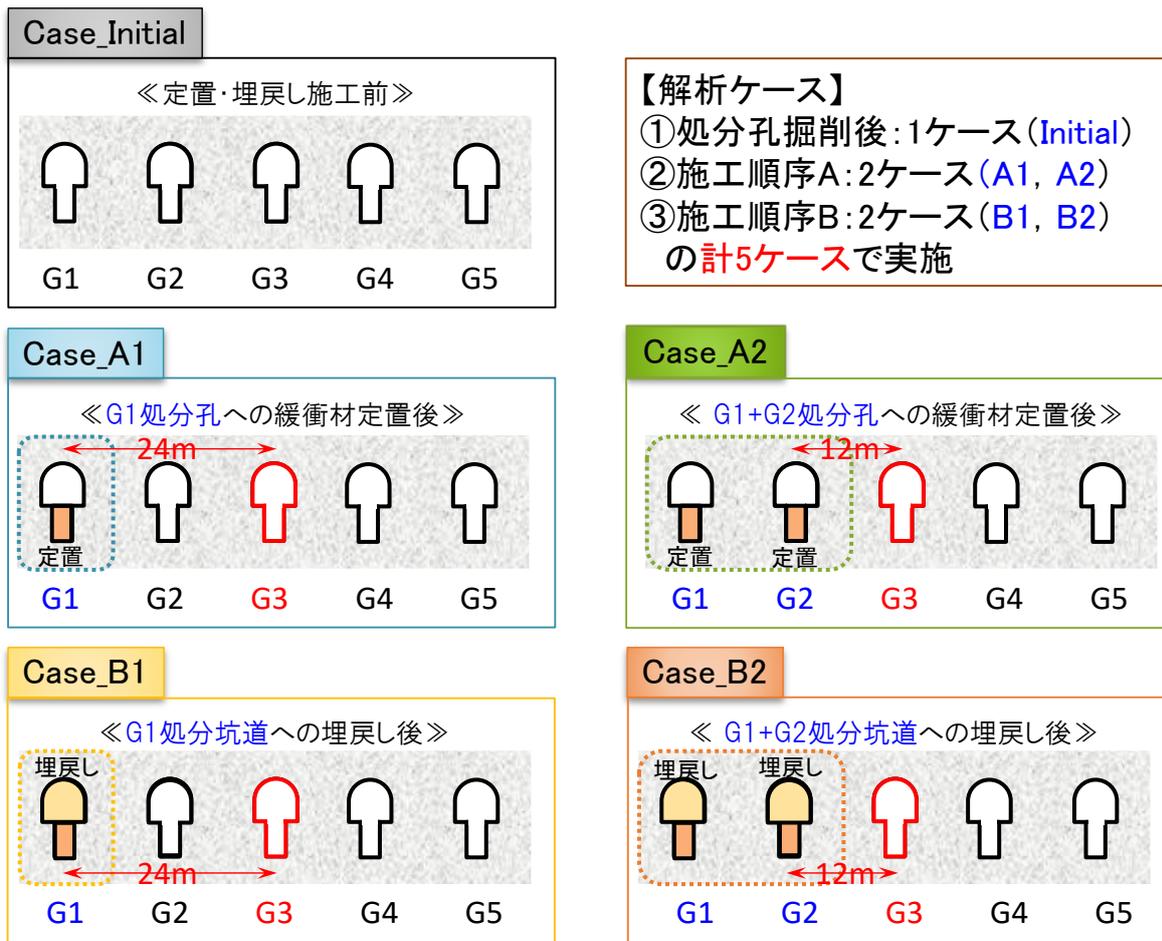


図 5.1.2-11 各解析ケースにおける処分孔、処分坑道の施工状況

3) 処分坑道湧水量の算定結果

a G3 処分坑道

2)で設定した解析ケースについて、10 リアライゼーションで G3 処分坑道の湧水量を算定した。その結果を表 5.1.2-3 と図 5.1.2-12 に示す。また、Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの湧水量の差（湧水変動量）を表 5.1.2-4 と図 5.1.2-13 に示す。さらに、定置・埋戻しによる影響を確認するために、Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの湧水量の倍率（湧水変動倍率）を算定した。湧水変動倍率の算定結果を表 5.1.2-5 と図 5.1.2-14 に示す。

- 定置・埋戻し掘削前

処分孔掘削後の状態である Case_Initial では、坑道湧水量は 10 リアライゼーションの平均で 4.40L/min であった。そのうち、HR03P では最も湧水量が少なく 0.62L/min、HR08P では最も湧水量が多く 21.20L/min となり、ばらつきが認められる。

- 施工順序 A（定置を先行したケース）

緩衝材の定置を先行する施工順序 A における算定結果を整理する。G1 処分坑道の緩衝材定置を行った状態の Case_A1 における坑道湧水量は平均で 4.40L/min であった。湧水変動量として

は、いずれのリアライゼーションでも 0.01L/min 以下であり、また、処分孔掘削後の Case_Initial からの湧水変動倍率としてもいずれも 1.00 倍と明瞭な変化が見られなかった。

G1 処分坑道および隣接処分坑道である G2 処分坑道の緩衝材定置を行った状態の Case_A2 における坑道湧水量は、平均で 4.42L/min であり、処分孔掘削後と比較して微増した。湧水変動量を確認すると、HR09P において最大で 0.04L/min (湧水変動量の平均値 0.02L/min に対して約 2.5 倍) 増加した。湧水変動倍率では、平均で 1.01 倍 (1%の増加)、HR09P において、最大 1.05 倍 (5%の増加) となった。

● 施工順序 B (定置後すぐに埋戻しをしたケース)

緩衝材定置後すぐに埋戻しを実施する施工順序 B における算定結果を整理する。G1 処分坑道の埋戻しおよび緩衝材定置を行った状態の Case_B1 における坑道湧水量は、平均で 4.47L/min であり湧水量の増加が確認された。湧水変動量はリアライゼーションごとにばらつきが見られ、HR05P では最大で 0.33L/min (湧水変動量の平均値 0.07L/min に対して約 4.9 倍) 増加した。湧水変動倍率としては、平均で 1.05 倍 (5%の増加)、HR05P で最大 1.35 倍 (35%の増加) となった。

G1 処分坑道および隣接の G2 処分坑道の定置・埋戻しを行った状態である Case_B2 では、坑道湧水量は平均で 5.72L/min であり全解析ケースの中で最も大きく増加している。湧水変動量としては、10 リアライゼーションの平均で 1.31L/min であり、最大で HR08P において 2.85L/min (湧水変動量の平均値 1.31L/min に対して約 2.2 倍) の湧水量の増加が確認された。なお、湧水変動倍率としては、平均で 1.68 倍 (68%の増加)、最大で HR04P において 2.70 倍 (170%の増加) となった。

表 5.1.2-3 各解析ケースでの G3 処分坑道湧水量の算定結果

G3	処分坑道湧水量 (L/min)				
	Initial	A1	A2	B1	B2
HR01P	2.17	2.17	2.19	2.17	3.00
HR02P	3.51	3.51	3.52	3.53	4.45
HR03P	0.62	0.62	0.63	0.64	1.03
HR04P	0.98	0.99	1.00	1.02	2.66
HR05P	0.94	0.94	0.94	1.27	2.08
HR06P	3.91	3.91	3.91	3.97	5.22
HR07P	4.34	4.34	4.35	4.46	5.68
HR08P	21.20	21.20	21.24	21.25	24.05
HR09P	0.72	0.72	0.76	0.73	1.82
HR10P	5.63	5.63	5.65	5.66	7.18
平均	4.40	4.40	4.42	4.47	5.72

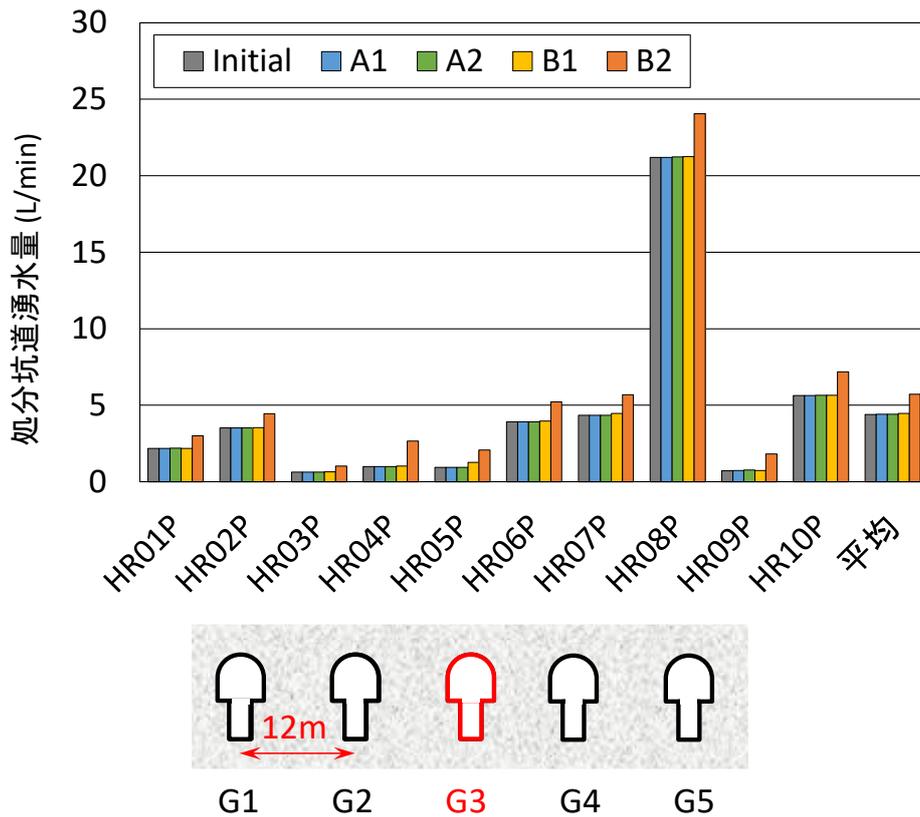


図 5.1.2-12 各解析ケースでの G3 処分坑道湧水量

表 5.1.2-4 Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G3 処分坑道湧水変動量の算定結果

G3	処分坑道湧水変動量 (L/min)			
	A1	A2	B1	B2
HR01P	0.00	0.02	0.00	0.83
HR02P	0.00	0.01	0.02	0.94
HR03P	0.00	0.00	0.02	0.41
HR04P	0.00	0.01	0.04	1.67
HR05P	0.00	0.00	0.33	1.14
HR06P	0.00	0.00	0.06	1.31
HR07P	0.00	0.01	0.12	1.34
HR08P	0.00	0.04	0.05	2.85
HR09P	0.00	0.04	0.01	1.10
HR10P	0.00	0.03	0.03	1.55
平均	0.00	0.02	0.07	1.31

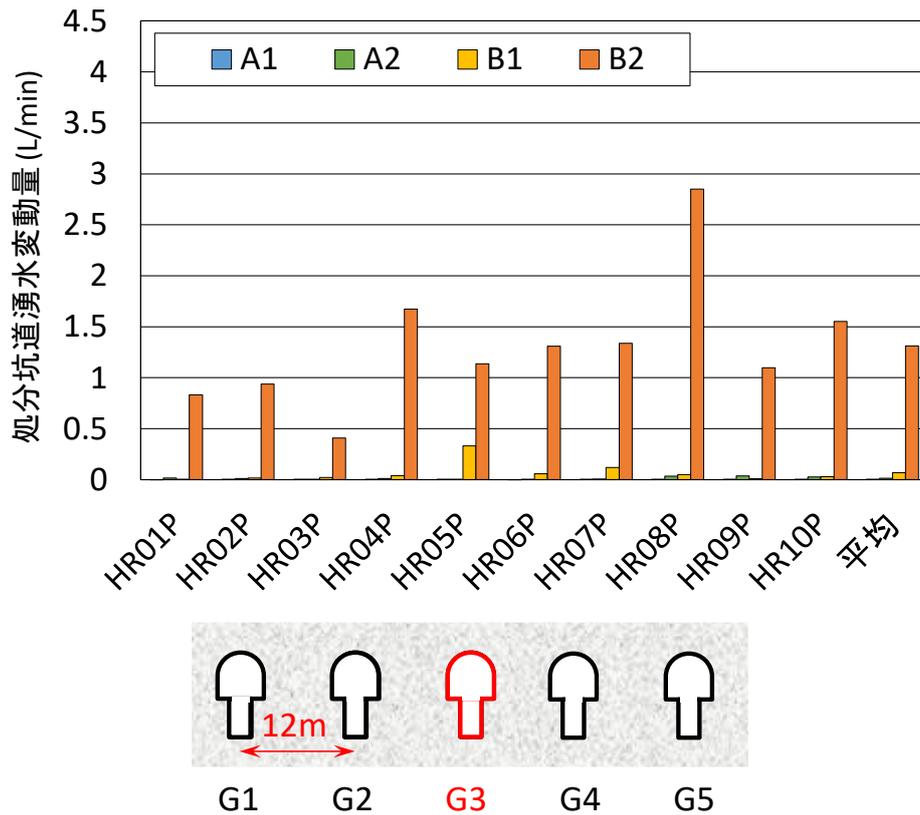


図 5.1.2-13 Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G3 処分坑道湧水変動量

表 5.1.2-5 Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G3 処分坑道湧水変動倍率の算定結果

G3	処分坑道湧水変動倍率 (倍)			
	A1	A2	B1	B2
HR01P	1.00	1.01	1.00	1.38
HR02P	1.00	1.00	1.00	1.27
HR03P	1.00	1.00	1.03	1.65
HR04P	1.00	1.01	1.04	2.70
HR05P	1.00	1.00	1.35	2.21
HR06P	1.00	1.00	1.01	1.34
HR07P	1.00	1.00	1.03	1.31
HR08P	1.00	1.00	1.00	1.13
HR09P	1.00	1.05	1.01	2.52
HR10P	1.00	1.00	1.01	1.28
平均	1.00	1.01	1.05	1.68

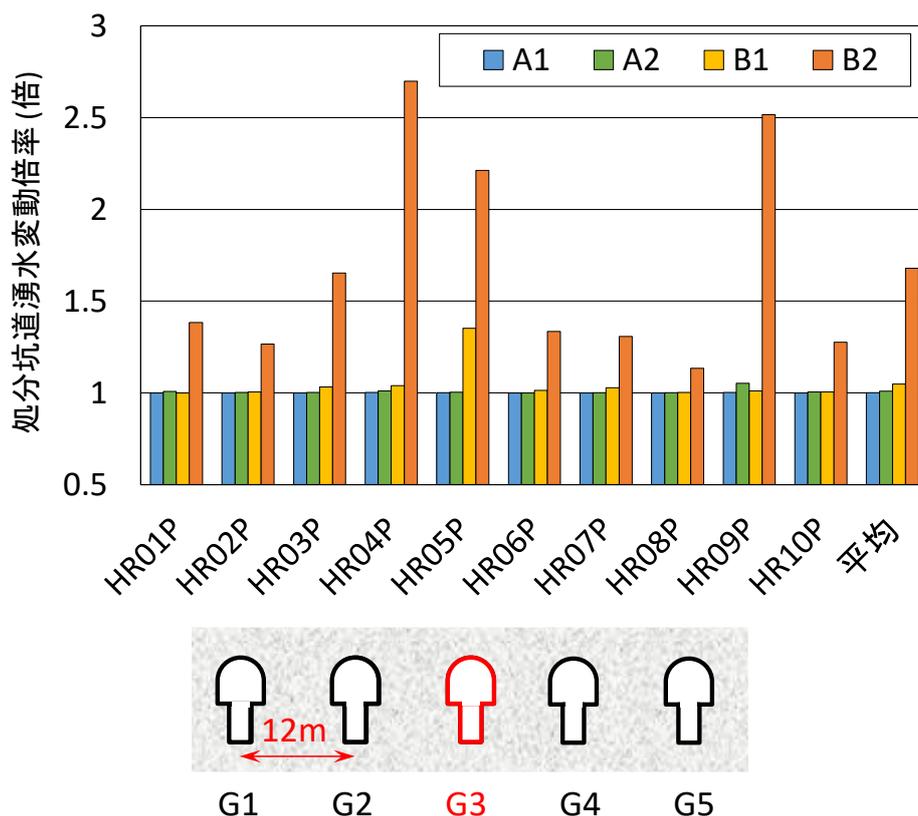


図 5.1.2-14 Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G3 処分坑道湧水変動倍率

b G2 処分坑道

G3 処分坑道の湧水挙動と比較するため、参考として G2 処分坑道を算定した。まず、G2 処分坑道の算定結果について整理する。各ケースにおける湧水量算定結果を表 5.1.2-6、図 5.1.2-15 に、湧水変動量の算定結果を表 5.1.2-7、図 5.1.2-16 に、湧水変動倍率の算定結果を表 5.1.2-8、図 5.1.2-17 にそれぞれ示す。

- 定置・埋戻し掘削前

処分孔掘削後の状態である Case_Initial では、G2 処分坑道の湧水量は HR03P で最も少なく 0.43L/min、HR09P で最も多く 23.65L/min、10 リアライゼーションの平均で 4.39L/min であった。これらは概ね G3 処分坑道の湧水量と同等の値である。

- 施工順序 A（定置を先行したケース）

G1 処分坑道の緩衝材を定置する Case_A1 では、湧水量は平均で 4.40L/min であり、湧水変動量としては約 0.02L/min、変動倍率としては 1.01 倍（1%の増加）であった。リアライゼーションごとの結果を見ると、最大でも、変動量は HR08P の 0.06L/min、変動倍率は HR02P の 1.02 倍（2%の増加）程度であった。

G1 処分坑道および評価対象の G2 処分坑道の定置を行う Case_A2 では、湧水量は平均で

4.81L/min であり、湧水変動量としては約 0.43L/min、変動倍率としては 1.20 倍（20%の増加）であった。リアライゼーションごとの結果を見ると、最大で変動量は HR05P の 0.86L/min、変動倍率は HR02P の 1.55 倍（55%の増加）であった。

● 施工順序 B（定置後すぐに埋戻しをしたケース）

施工順序 B のうち G1 処分坑道の定置・埋戻しを行う Case_B1 では、湧水量は平均で 5.80L/min であり、湧水変動量としては約 1.41L/min、変動倍率としては 1.52 倍（52%の増加）であった。リアライゼーションごとの結果を見ると、最大で変動量は HR09P の 4.21L/min、変動倍率は HR10P の 2.21 倍（121%の増加）であった。これらの結果は、同一距離での G3 処分坑道（Case_A2、Case_B2）の湧水変動よりも大きい結果である。埋戻しの対象となる隣接処分坑道が境界条件の影響を受けていることが考えられる G1 処分坑道であるため、埋戻しによる影響が大きくなったものと考えられる。

表 5.1.2-6 各解析ケースでの G2 処分坑道湧水量の算定結果

G2	処分坑道湧水量 (L/min)				
	Initial	A1	A2	B1	B2
HR01P	1.88	1.88	2.20	1.91	0.00
HR02P	1.16	1.16	1.33	1.42	0.00
HR03P	0.43	0.43	0.50	0.77	0.00
HR04P	1.06	1.08	1.65	1.89	0.00
HR05P	4.84	4.87	5.70	6.69	0.00
HR06P	3.43	3.43	3.53	5.70	0.00
HR07P	1.38	1.38	1.68	2.31	0.00
HR08P	4.24	4.31	4.79	5.47	0.00
HR09P	23.65	23.68	24.31	27.86	0.00
HR10P	1.80	1.80	2.46	3.97	0.00
平均	4.39	4.40	4.81	5.80	0.00

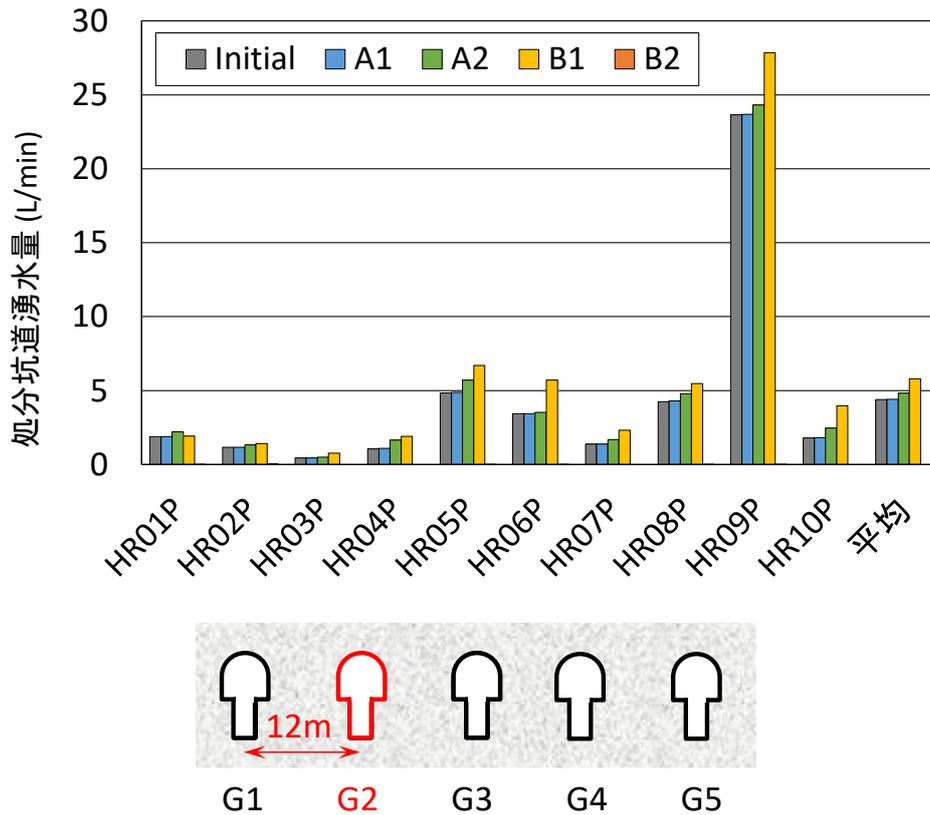


図 5.1.2-15 各解析ケースでの G2 処分坑道湧水量

表 5.1.2-7 Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G2 処分坑道湧水変動量の算定結果

G2	処分坑道湧水変動量 (L/min)			
	A1	A2	B1	B2
HR01P	0.00	0.31	0.03	-1.88
HR02P	0.00	0.17	0.26	-1.16
HR03P	0.00	0.07	0.34	-0.43
HR04P	0.02	0.59	0.83	-1.06
HR05P	0.03	0.86	1.85	-4.84
HR06P	0.00	0.10	2.27	-3.43
HR07P	0.01	0.30	0.93	-1.38
HR08P	0.06	0.55	1.23	-4.24
HR09P	0.04	0.66	4.21	-23.65
HR10P	0.00	0.66	2.17	-1.80
平均	0.02	0.43	1.41	-4.39

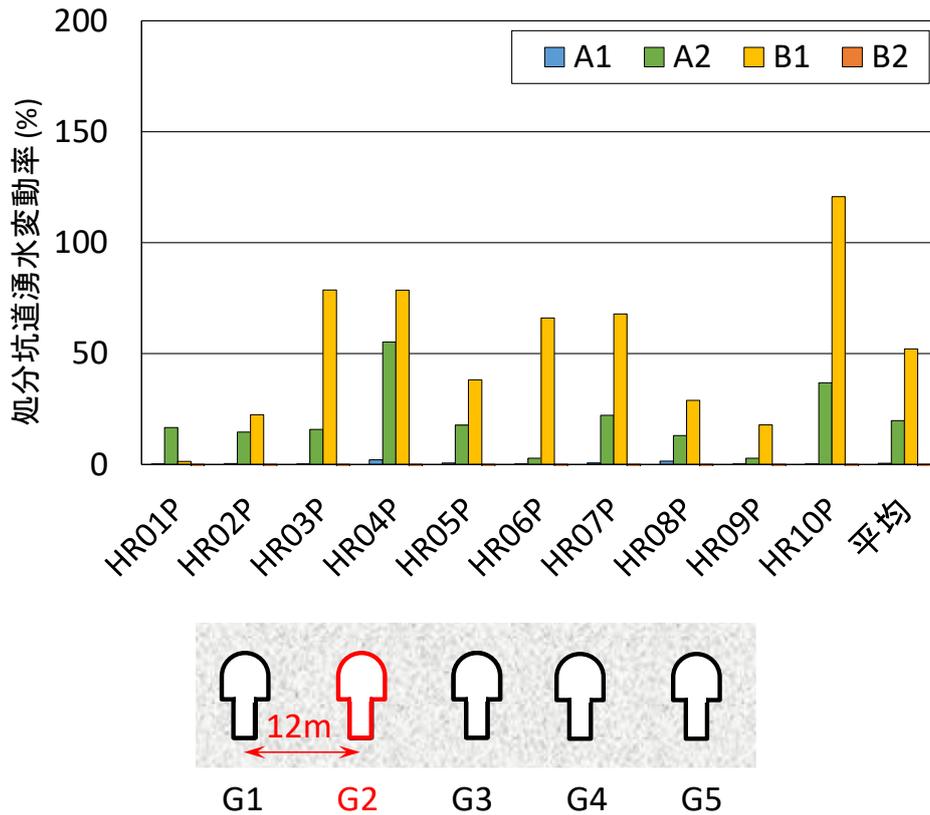


図 5.1.2-16 Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G2 処分坑道湧水変動量

表 5.1.2-8 Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G2 処分坑道湧水変動倍率の算定結果

G2	処分坑道湧水変動倍率 (倍)			
	A1	A2	B1	B2
HR01P	1.00	1.17	1.01	0.00
HR02P	1.00	1.15	1.22	0.00
HR03P	1.00	1.16	1.79	0.00
HR04P	1.02	1.55	1.79	0.00
HR05P	1.01	1.18	1.38	0.00
HR06P	1.00	1.03	1.66	0.00
HR07P	1.01	1.22	1.68	0.00
HR08P	1.02	1.13	1.29	0.00
HR09P	1.00	1.03	1.18	0.00
HR10P	1.00	1.37	2.21	0.00
平均	1.01	1.20	1.52	0.00

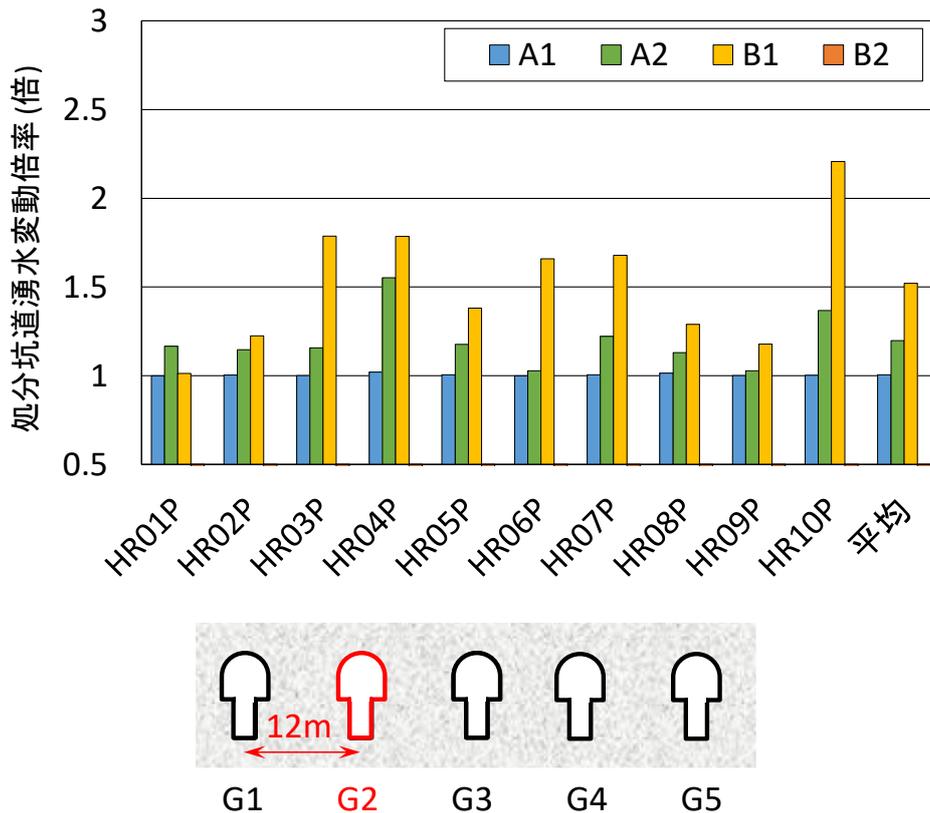


図 5.1.2-17 Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G2 処分坑道湧水変動倍率

c G4 処分坑道

G3 処分坑道の湧水挙動と比較するため、参考として G4 処分坑道を算定した。各ケースにおける湧水量算定結果を表 5.1.2-9、図 5.1.2-18 に、湧水変動量の算定結果を表 5.1.2-10、図 5.1.2-19 に、湧水変動倍率の算定結果を表 5.1.2-11、図 5.1.2-20 にそれぞれ示す。

- 定置・埋戻し掘削前

処分孔掘削後の状態である Case_Initial では、HR05P で最も湧水量が少なく 0.08L/min、HR08P で最も湧水量が多く、13.31L/min、10 リアライゼーションの平均で 2.92L/min であった。

- 施工順序 A (定置を先行したケース)

緩衝材定置を先行する施工順序 A では、Case_A1、CaseA2 とともに湧水変動量は 0.01L/min 未満であり、変動倍率で 1.00 倍と明瞭な変化が見られなかった。

- 施工順序 B (定置後すぐに埋戻しをしたケース)

G1 処分坑道の定置・埋戻しをする Case_B1 については、湧水量は平均で 2.93L/min であり、湧水変動量としては約 0.00L/min、変動倍率としては 1.02 倍 (2%の増加) であった。また最大でも、湧水変動量は 0.01L/min、変動倍率は 1.13 倍であった。

次に、G1 処分坑道および G2 処分坑道の定置・埋戻しを行う Case_B2 では、湧水量は平均で

2.97L/min と増加が認められた。ただし湧水変動量としては約 0.05L/min、変動倍率としては 1.07 倍（7%の増加）に留まった。リアライゼーションごとの結果を見ると、最大で変動量は HR08P の 0.11L/min、変動倍率は HR05P の 1.29 倍（29%の増加）であった。

表 5.1.2-9 各解析ケースでの G4 処分坑道湧水量の算定結果

G4	処分坑道湧水量 (L/min)				
	Initial	A1	A2	B1	B2
HR01P	2.91	2.91	2.91	2.91	2.95
HR02P	5.54	5.54	5.54	5.54	5.58
HR03P	2.47	2.47	2.47	2.47	2.49
HR04P	0.44	0.44	0.44	0.44	0.45
HR05P	0.08	0.08	0.08	0.09	0.11
HR06P	0.44	0.44	0.44	0.45	0.52
HR07P	2.41	2.41	2.41	2.41	2.46
HR08P	13.31	13.31	13.32	13.32	13.43
HR09P	0.65	0.65	0.65	0.65	0.67
HR10P	0.99	0.99	1.00	1.00	1.05
平均	2.92	2.92	2.92	2.93	2.97

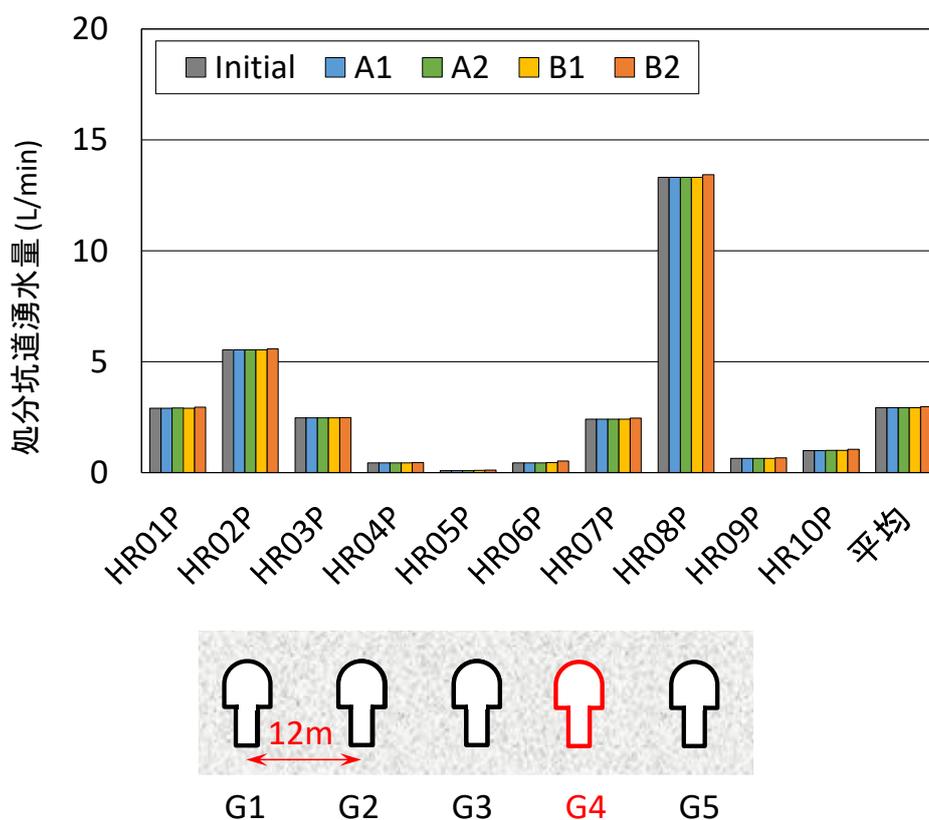


図 5.1.2-18 各解析ケースでの G4 処分坑道湧水量

表 5.1.2-10 Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G4 処分坑道湧水変動量の算定結果

G4	処分坑道湧水変動量 (L/min)			
	A1	A2	B1	B2
HR01P	0.00	0.00	0.00	0.04
HR02P	0.00	0.00	0.00	0.04
HR03P	0.00	0.00	0.00	0.02
HR04P	0.00	0.00	0.00	0.01
HR05P	0.00	0.00	0.01	0.02
HR06P	0.00	0.00	0.01	0.08
HR07P	0.00	0.00	0.01	0.05
HR08P	0.00	0.00	0.00	0.11
HR09P	0.00	0.00	0.00	0.02
HR10P	0.00	0.00	0.00	0.06
平均	0.00	0.00	0.00	0.05

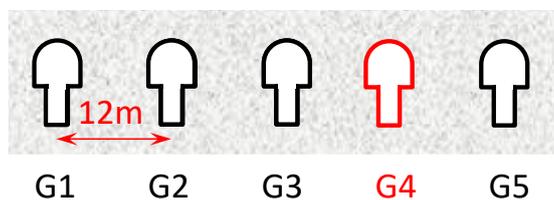
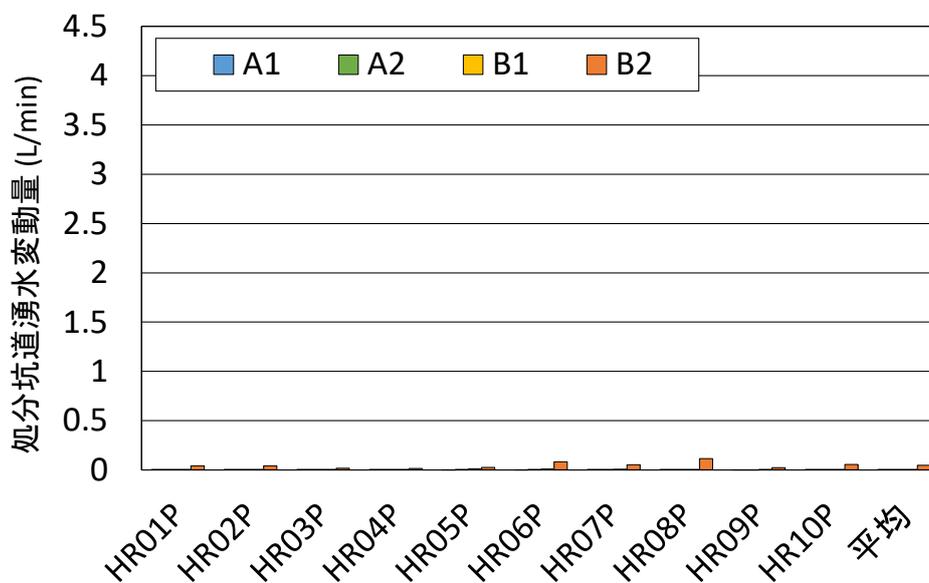


図 5.1.2-19 Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G4 処分坑道湧水変動量

表 5.1.2-11 Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G4 処分坑道湧水変動倍率の算定結果

G4	処分坑道湧水変動倍率 (倍)			
	A1	A2	B1	B2
HR01P	1.00	1.00	1.00	1.01
HR02P	1.00	1.00	1.00	1.01
HR03P	1.00	1.00	1.00	1.01
HR04P	1.00	1.00	1.00	1.03
HR05P	1.00	1.00	1.13	1.29
HR06P	1.00	1.00	1.02	1.19
HR07P	1.00	1.00	1.00	1.02
HR08P	1.00	1.00	1.00	1.01
HR09P	1.00	1.00	1.00	1.03
HR10P	1.00	1.00	1.00	1.06
平均	1.00	1.00	1.02	1.07

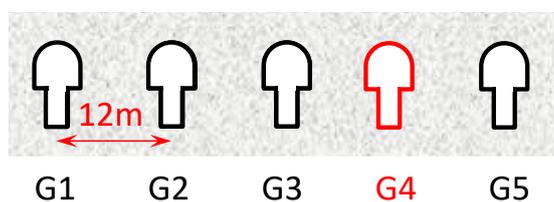
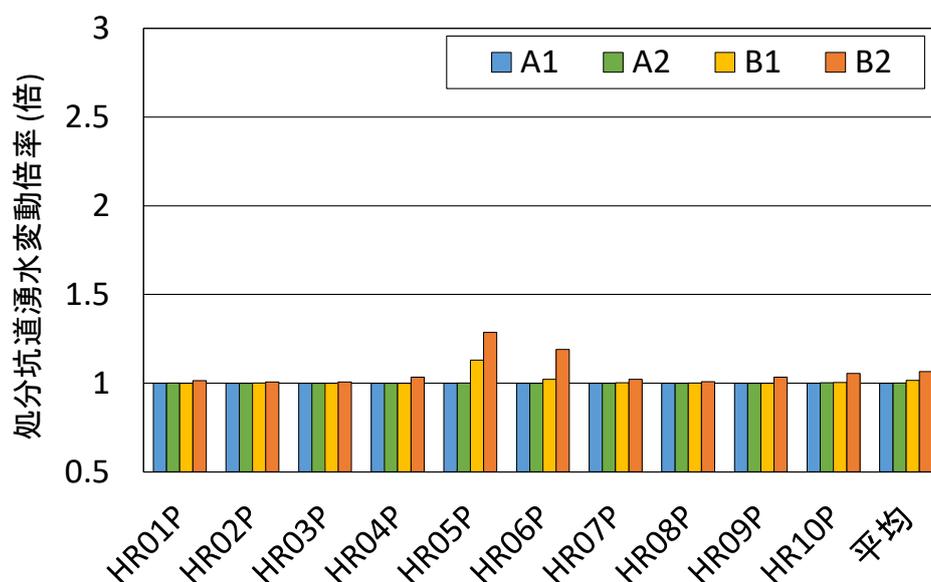


図 5.1.2-20 Case_Initial の湧水量に対する各解析ケースでの G4 処分坑道湧水変動倍率

d まとめ

定置・埋戻しを行った場合の各ケースにおける処分坑道湧水量の変化を整理する。図 5.1.2-21 に G3 処分坑道、図 5.1.2-22 に G2 処分坑道、図 5.1.2-23 に G4 処分坑道の湧水量の変化を整理する。

● G3 処分坑道

定置・埋戻しに対する影響として、Case_A1 を除き、周辺の処分坑道の湧水量は増加することが確認された。また、同一施工順序で湧水量を比較すると、Case_A1 から Case_A2 にかけて、また Case_B1 から Case_B2 にかけて湧水量が増加しており、施工の進展に伴い G3 坑道の湧水変動量が大きくなる結果となった。これは、周辺坑道での定置や埋戻しにより周辺の動水勾配が変化することで、元々定置・埋戻しを行った処分孔・処分坑道に向かって流れていた湧水の流動経路が変化し、動水勾配の高くなった隣接の処分坑道へ流出したことによるものと考えられる。

ただし、湧水増加量は同一の解析ケースでも一様ではなく、リアライゼーションによりばらつきが見られた（最大で、10R の湧水変動量の平均値の約 4.9 倍増加）。また、最大の湧水変動量を示すリアライゼーションを解析ケースごとに確認すると、Case_A2 では HR09P、Case_B1 では HR05P、Case_B2 では HR08P であり、それぞれ異なることが確認された。これらは、定置・埋戻しを実施した箇所に交差する割れ目の分布が、リアライゼーションごとに異なるために、定置・埋戻しによる効果が一定とならなかったと考えられる。

施工順序の違いによる影響程度を比較する。緩衝材の定置を先行して行う施工順序 A では、最も湧水量の変化が大きい場合でも初期の湧水量に対する変動率は 5%程度であった。一方、定置後に埋戻しを行う施工順序 B では、隣接の処分坑道を施工した場合平均 1.7 倍、最大で 2.7 倍湧水量が増加した。割れ目の分布による変動量のばらつきを考慮しても、緩衝材の定置を先行して行う施工順序よりも、定置後に埋戻しを行う施工順序の方が周辺の地下水流動に与える影響が大きいことが示された。

● G2 処分坑道

G3 処分坑道と同様、定置・埋戻しにより、またその進展に伴い湧水量が増加することが確認された。施工順序の違いによる湧水変動量を比較する。緩衝材の定置を先行する施工順序 A では G2 処分坑道の定置を行った場合でも、湧水増加量はいずれも 1L/min 未満であったのに対して、定置後に埋戻しを行う施工順序 B では、隣接処分坑道 G1 を埋め戻した場合に、最大で約 4L/min の増加が確認された。このことから、緩衝材の定置を先行して行う施工順序よりも、定置後に埋戻しを行う施工順序の方が周辺の地下水流動に与える影響が大きいことが示された。

● G4 処分坑道

G4 処分坑道では、緩衝材の定置による影響はほとんど確認されなかった。また、埋戻しを行う施工順序 B のケースでも、増加量は最大で 0.1L/min 程度であり影響は軽微であった。

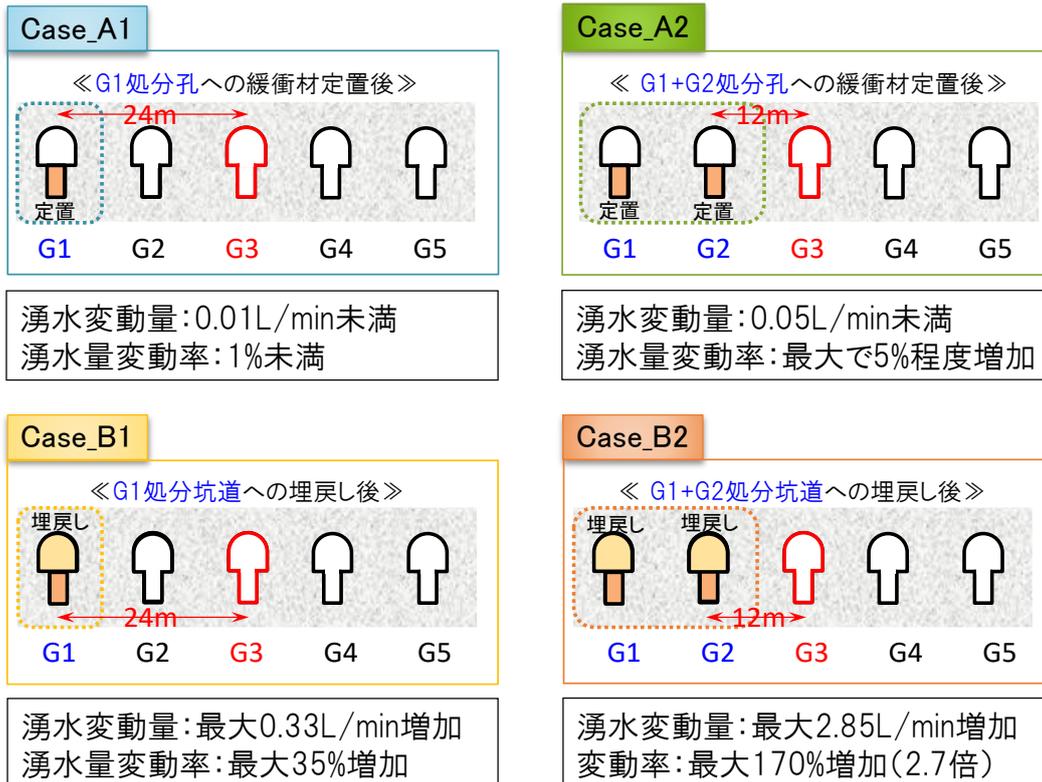


図 5.1.2-21 定置・埋戻しを行った場合の各ケースにおける G3 処分坑道湧水量の変化のまとめ

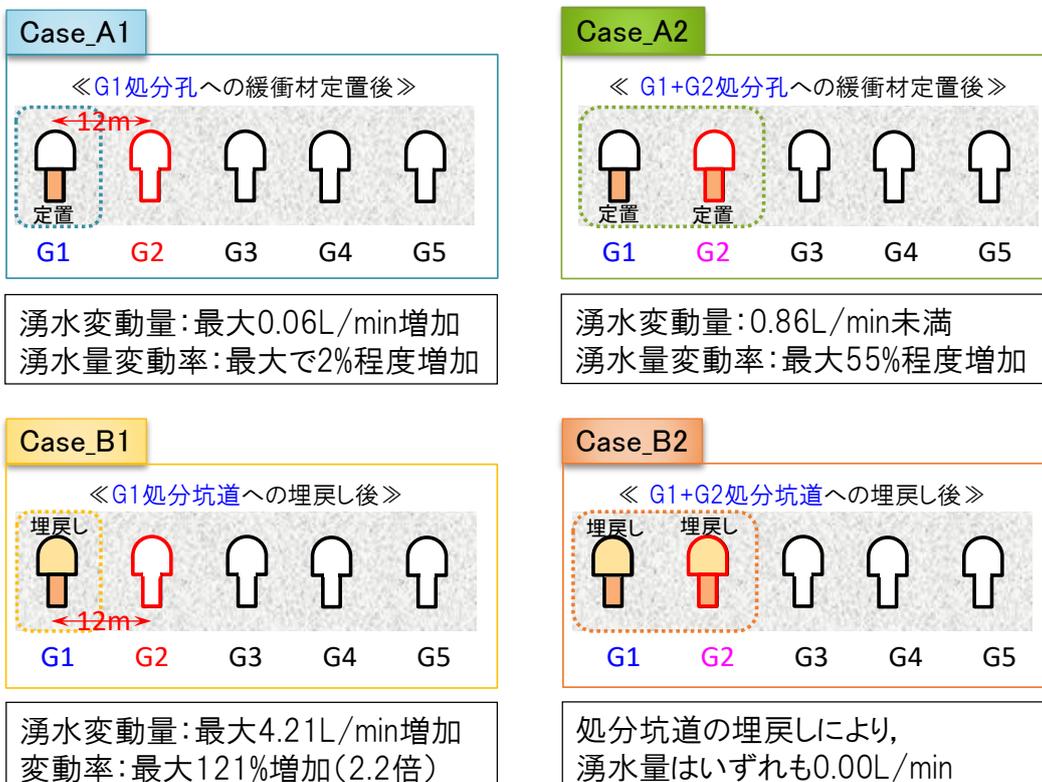


図 5.1.2-22 定置・埋戻しを行った場合の各ケースにおける G2 処分坑道湧水量の変化のまとめ

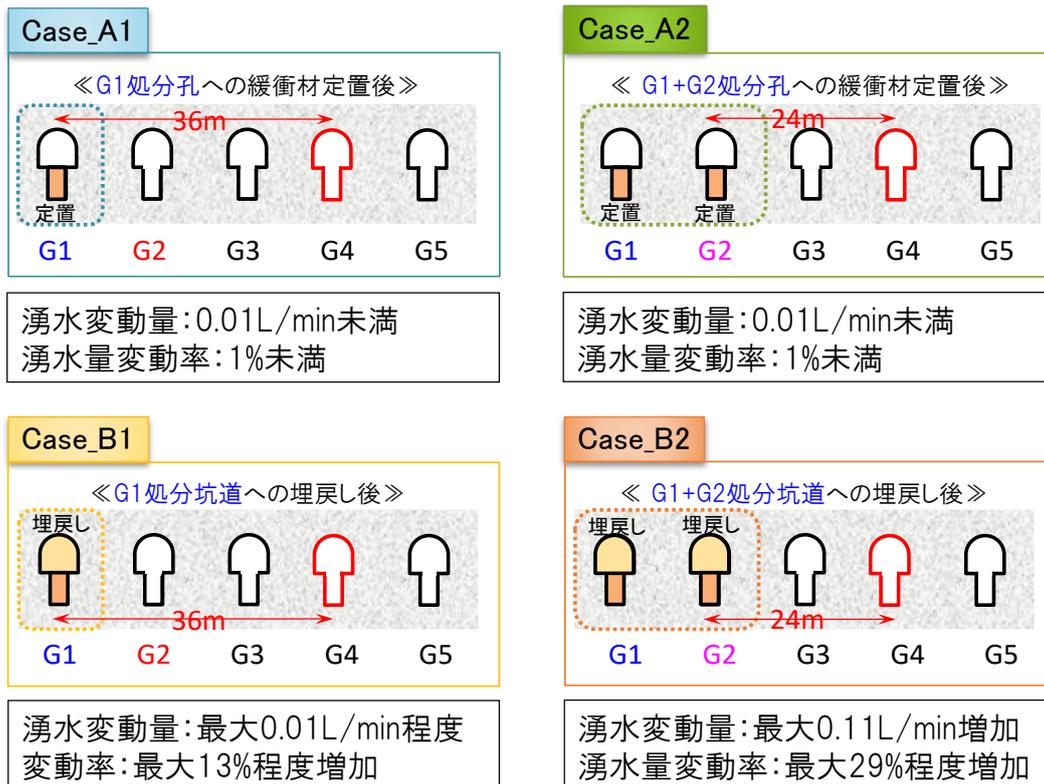


図 5.1.2-23 定置・埋戻しを行った場合の各ケースにおける G4 処分坑道湧水量の変化のまとめ

4) 処分坑道湧水量の変動に関する考察

a 処分坑道 (G1) の定置・埋戻しによる影響に関する考察

4)では、各処分坑道において、各解析ケースにおける湧水量を評価した。ここでは、同一施工段階における処分坑道湧水量について確認した。

図 5.1.2-24 に G1 処分坑道の緩衝材定置を実施した Case_A1 における、G2 処分坑道、G3 処分坑道、G4 処分坑道の湧水変動量の比較結果を示す。また、図 5.1.2-25 に G1 処分坑道の定置・埋戻しを実施した Case_B1 における、G2、G3、G4 坑道の湧水変動量の比較結果を示す。なお、G1 処分坑道から G2、G3、G4 処分坑道までの距離は、それぞれ 12m、24m、36m である。これらの結果より、概ね G1 処分坑道からの距離が G2、G3、G4 と大きくなるにつれて湧水増加量が 1 オーダー程度ずつ小さくなっている。これは、G1 処分坑道の埋戻しにより G1 領域の水位が回復し、より近い坑道に大きな動水勾配が生じたことが要因と考えられる。このことから、定置・埋戻しの実施箇所からの距離が長いほど、また、施工箇所との間にある流出領域が大きいほど、その影響は大きく軽減されることが示唆される。ただし、その変動の傾き (G1 処分坑道からの距離と湧水変動量の関係) にはリアライゼーション毎にばらつきが見られ、処分孔及び坑道に交差する割れ目の分布によりその効果にはばらつきが発生すると考えられる。

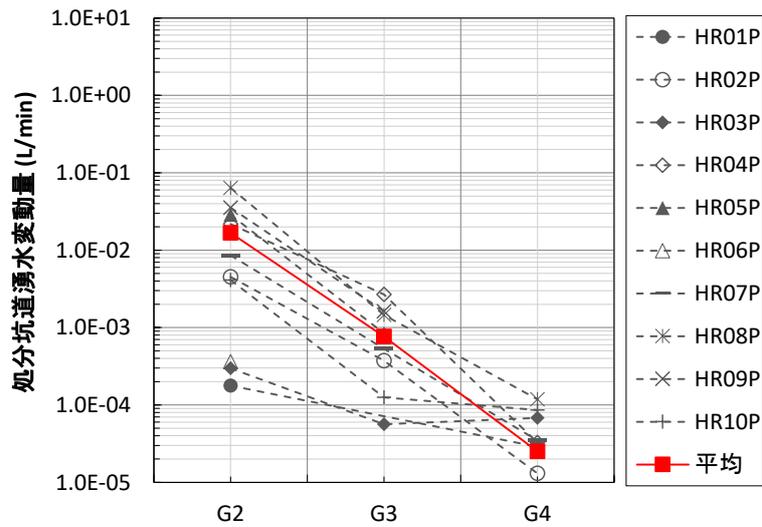


図 5.1.2-24 Case_A1 における、G2、G3、G4 処分坑道の湧水変動量

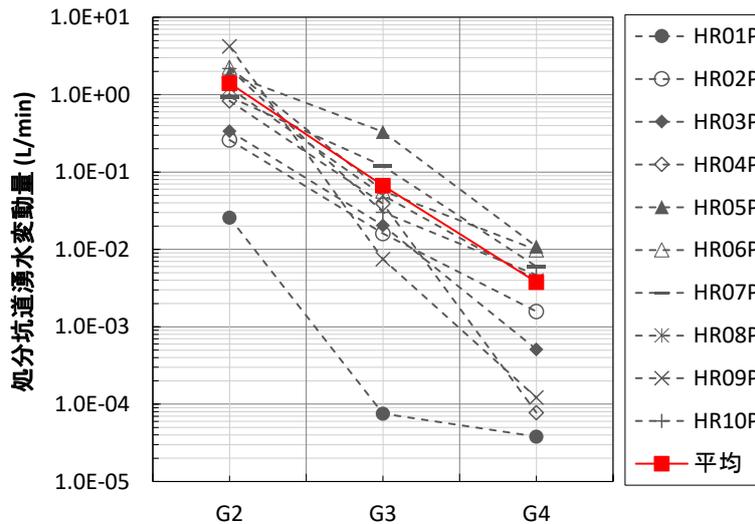


図 5.1.2-25 Case_B1 における、G2、G3、G4 処分坑道の湧水変動量

b 湧水量の変動要因についての考察（施工順序 B）

埋戻しにより周辺処分坑道の湧水量が変動した要因について考察する。ここで対象とする処分坑道は G3 処分坑道とし、施工順序は比較的湧水変動の大きかった施工順序 B とした。湧水量の変化を比較する際、Case_B1 では、G1 処分坑道の埋め戻し前の湧水量、Case_B2 では隣接する G2 処分坑道の影響が大きいと考えられることから G2 坑道の埋め戻し前の湧水量を比較対象とした。図 5.1.2-26 に Case_B1、図 5.1.2-27 に Case_B2 における G3 処分坑道の湧水量との関係を示す。両者とも、図中の赤い点が示す HR09P を除き、埋戻し対象の処分坑道の湧水量と弱い相関が認められる（G1 処分坑道湧水量と Case_B1 の G3 処分坑道湧水変動量の決定係数は 0.69、G2 処分坑道湧水量と Case_B2 の G3 処分坑道湧水変動量の決定係数は 0.25）。ここで、図 5.1.2-28

に HR09P の処分孔掘削後の処分坑道湧水量分布を、図 5.1.2-29 に G3 処分坑道と交差する割れ目の分布図を示す。湧水量分布から、G2 処分坑道の端部に高湧水割れ目が交差していることが確認できる。一方で、G3 坑道の交差割れ目を見ると、上記の高湧水割れ目は G3 処分坑道とは連結していない。そのため、G2 を埋め戻したことによる直接的な湧水の流入が発生しなかったと考えられる。また、G3 坑道には全体的に高湧水割れ目が少ないことから G1、G2 坑道の湧水量に相当する湧水変動が発生しなかったことが考えられる。

以上より、埋戻しを実施する処分坑道の湧水量に応じて、概ね周辺の湧水量も大きくなることが示唆された。ただし、割れ目の交差状況によっては、単純に湧水量に依存しない場合も発生する可能性が示唆された。

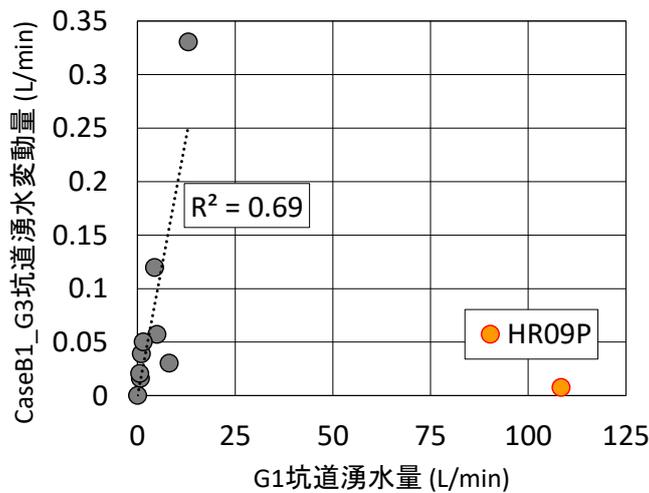


図 5.1.2-26 G1 処分坑道湧水量と CaseB1 の G3 処分坑道湧水変動量

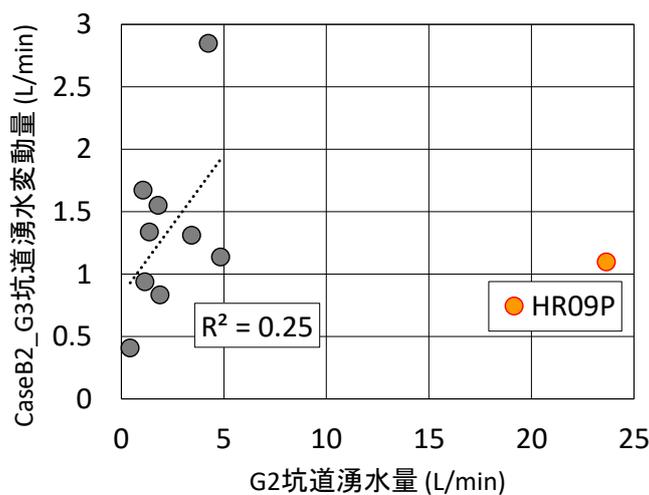


図 5.1.2-27 G2 処分坑道湧水量と CaseB2 の G3 処分坑道湧水変動量

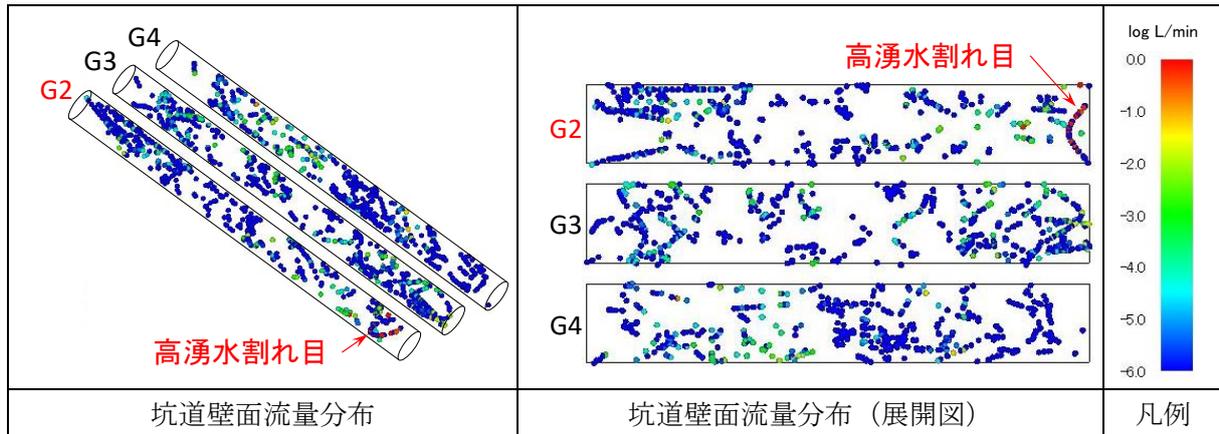


図 5.1.2-28 HR09P の処分孔掘削後の処分坑道壁面流量分布

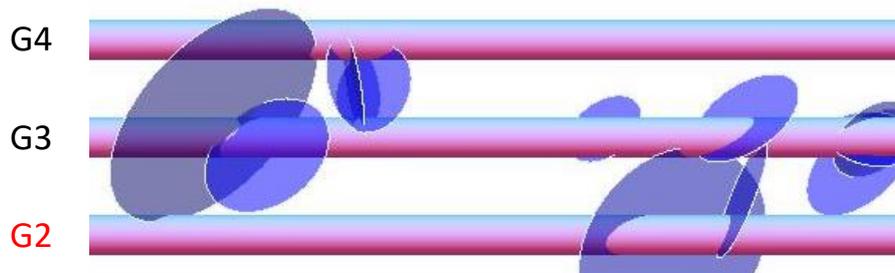


図 5.1.2-29 HR09P の G3 処分坑道交差割れ目分布 (0.01L/min 以上)

c 湧水変動量と割れ目分布に関する考察

湧水変動量に対して影響を及ぼす要因を検討するため、まず G3 処分坑道を対象に、湧水の変動が大きかったケースを抽出する。図 5.1.2-30 に Case_B2 における G3 処分坑道の湧水変動量と湧水変動率の関係を示す。図中の黒点は HR08P を示しているが、湧水変動量が大いにも関わらず、変動倍率が小さい。これは、埋戻しを行う前から湧水量が多い状態 (21.20L/min) であったため、埋戻しにより湧水量が増加しても、相対的に見ると影響が小さい状況と言える。一方で、図中の赤点の示す HR04P は湧水変動量と変動倍率がともに大きいことから、埋戻しによる湧水変動が大きいケースであると言える。

そこで、HR04P について、湧水挙動を確認する。図 5.1.2-31 に HR04P の処分坑道交差割れ目分布 (0.01L/min 以上) を、図 5.1.2-32 に HR04P の Case_Initial と Case_B2 における処分坑道壁面流量分布に展開図を示す。流量分布図から G3 処分孔に交差している割れ目に沿って、大きく湧水量が変化していることが確認できる。特に、埋戻しの対象である G2 坑道と連結している割れ目や交差割れ目の密度が高い箇所において、比較的湧水変動が大きいことが確認できる。以上より、埋戻しにより周辺の処分坑道では湧水量が増加するが、その変動は均一ではなく、流出域に交差する割れ目の分布状況に依存してばらつくことが示唆された。

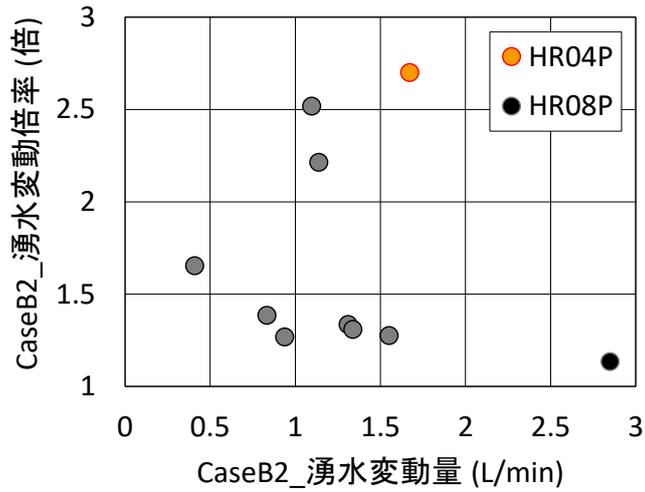


図 5.1.2-30 Case_B2 における G3 処分坑道の湧水変動量と湧水変動率の関係

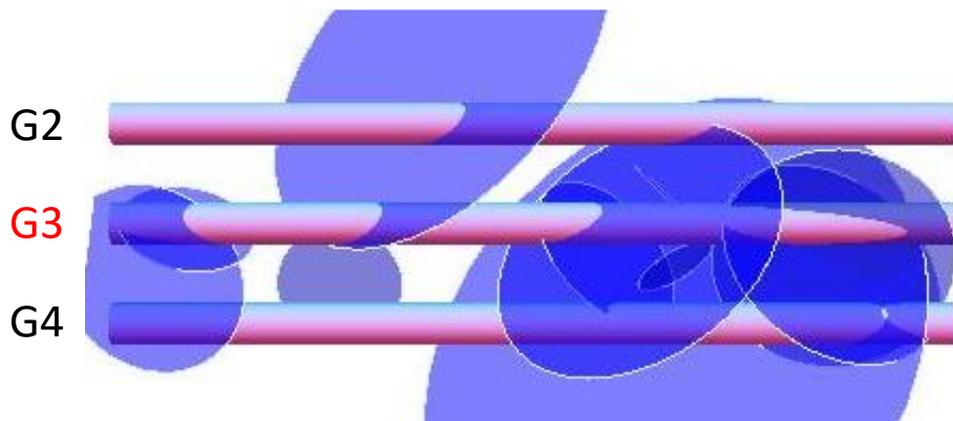


図 5.1.2-31 HR04P の G3 処分坑道交差割れ目分布 (0.01L/min 以上)

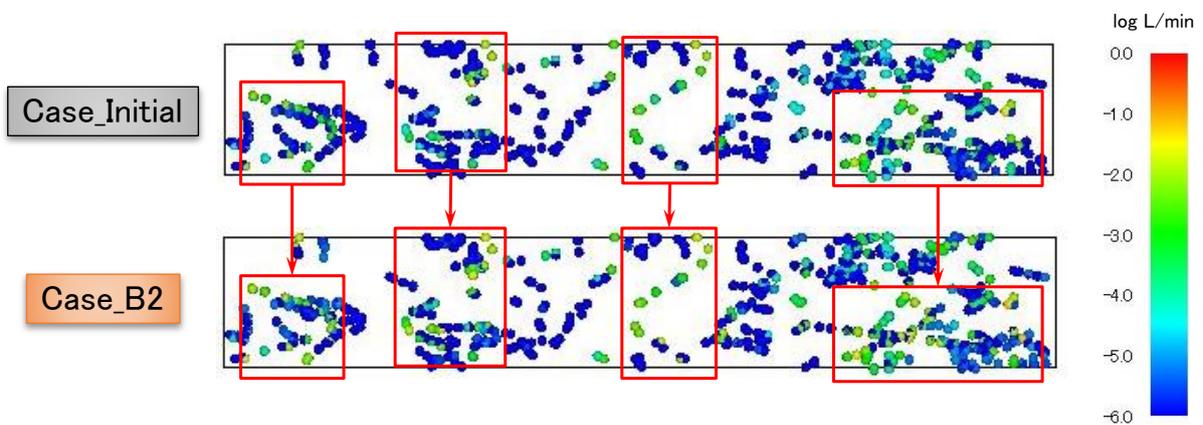


図 5.1.2-32 HR04P の Case_Initial と Case_B2 における処分坑道壁面流量分布 (展開図)

5) 処分孔湧水量の算定結果

a G3 処分坑道

2)で設定した解析ケースについて、全 10 リアライゼーションで G3 処分坑道における処分孔湧水量、Case_Initial からの湧水変動量、Case_Initial に対する変動倍率を算定した。なお、変動倍率については、Case_Initial の湧水量がほぼ 0 になるような処分孔の変動倍率を計算すると過度に大きな倍率となる可能性があるため、湧水量が 0.01L/min 以上の処分孔について評価を行った。湧水量の算定結果を表 5.1.2-12、図 5.1.2-33、図 5.1.2-34 に、湧水変動量の結果を表 5.1.2-13、図 5.1.2-35、図 5.1.2-36 に、湧水変動倍率の結果を表 5.1.2-14、図 5.1.2-37、図 5.1.2-38 にそれぞれ示す。また、図 5.1.2-39 に処分孔湧水挙動の結果をまとめる。

● 定置・埋戻し掘削前

処分孔掘削後の状態である Case_Initial では、G3 処分坑道の処分孔湧水量は 0.00～4.36L/min であり、処分孔 1 孔あたりの平均では 0.19L/min であった。

● 施工順序 A（定置を先行したケース）

緩衝材の定置を先行する施工順序 A では、Case_A1、Case_A2 とも明瞭な湧水量の変化はなく、平均では 0.19L/min のままであった。また、湧水増加量としては最大でも 0.02L/min、湧水変動倍率としては Case_A2 の平均で 1.02 倍（2%の増加）、最大でも 1.42 倍（42%の増加）であった。

● 施工順序 B（定置後すぐに埋戻しをしたケース）

G1 処分坑道を埋め戻す Case_B1 では、湧水量の変化はほとんどなく平均で 0.19L/min のままであった。湧水変動倍率では、最大で HR05P の処分孔 02 で 2.09 倍であったが、変動量としては 0.02L/min と影響は小さい。

一方で、隣接の処分坑道（G2）まで埋戻しを行う Case_B2 では、湧水量は 0.00～4.84L/min であり、処分孔 1 孔あたりの平均では 0.23L/min に増加した。湧水変動量としては最大で 0.49L/min 増加する処分孔、また変動倍率としては最大で 7.89 倍（0.00L/min から 0.13L/min に増加）となる処分孔も確認された。

● 許容湧水量を超過する処分孔の孔数

NUMO[3]によると、縦置き方式における緩衝材の定置時の許容湧水量は 0.63L/min であることを示している。そこで、表 5.1.2-15 に G3 処分坑道において処分孔湧水量が許容湧水量 0.63L/min を超過した処分孔の孔数（以下、超過孔数）を各解析ケースについてまとめた。その結果、Case_Initial では超過孔数は処分孔合計 100 孔中で 8 孔であり、隣接処分坑道を埋め戻す Case_B2 においても超過孔数には変化が無く 8 孔のままであった。

以上のことから、定置・埋戻しを行うことにより周辺処分孔の湧水量は増加するものの、緩衝材施工品質に及ぼす影響は小さいことが示唆される。

表 5.1.2-12 定置・埋戻し後の処分孔湧水量算定結果 (G3 処分坑道)

G3	処分孔No.	処分孔湧水量 (L/min)					G3	処分孔No.	処分孔湧水量 (L/min)				
		Initial	A1	A2	B1	B2			Initial	A1	A2	B1	B2
HR01P	01	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	HR06P	01	0.10	0.10	0.10	0.11	0.13
	02	0.22	0.22	0.22	0.22	0.27		02	0.12	0.12	0.12	0.13	0.20
	03	0.08	0.08	0.08	0.08	0.14		03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.08
	04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04		04	0.12	0.12	0.12	0.14	0.24
	05	0.21	0.21	0.22	0.21	0.36		05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.09
	06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02		06	0.32	0.32	0.32	0.37	0.53
	07	0.32	0.32	0.33	0.32	0.50		07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
	08	0.19	0.19	0.20	0.19	0.33		08	0.05	0.05	0.05	0.05	0.11
	09	0.24	0.24	0.24	0.24	0.32		09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11
HR02P	01	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	HR07P	01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
	02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.15		02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02		03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05
	04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02		04	0.79	0.79	0.79	0.82	0.92
	05	0.10	0.10	0.10	0.10	0.14		05	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11
	06	0.15	0.15	0.15	0.15	0.20		06	0.25	0.25	0.25	0.25	0.34
	07	0.15	0.15	0.15	0.15	0.17		07	0.33	0.33	0.33	0.33	0.37
	08	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13		08	1.05	1.05	1.06	1.06	1.09
	09	0.16	0.16	0.16	0.16	0.17		09	0.82	0.82	0.82	0.83	0.87
	10	0.28	0.28	0.28	0.28	0.31		10	0.18	0.18	0.18	0.19	0.27
HR03P	01	0.04	0.04	0.04	0.04	0.09	HR08P	01	4.36	4.36	4.36	4.36	4.84
	02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.09		02	0.64	0.64	0.64	0.64	0.65
	03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04		03	0.88	0.88	0.88	0.88	0.98
	04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.14		04	0.54	0.54	0.54	0.55	0.60
	05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		05	0.26	0.26	0.26	0.26	0.28
	06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		06	1.19	1.19	1.19	1.19	1.31
	07	0.18	0.18	0.19	0.18	0.20		07	0.52	0.52	0.52	0.52	0.58
	08	0.14	0.14	0.14	0.14	0.18		08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.33
	09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		09	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
HR04P	01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	HR09P	01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
	02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04		02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05		03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		04	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
	05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.13		06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	07	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03		07	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03		08	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
	09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		09	0.00	0.00	0.01	0.00	0.08
	10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03		10	0.31	0.31	0.32	0.32	0.43
HR05P	01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.08	HR10P	01	0.47	0.47	0.47	0.47	0.50
	02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.10		02	0.09	0.09	0.09	0.09	0.16
	03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02		03	0.24	0.24	0.26	0.25	0.37
	04	0.09	0.09	0.09	0.09	0.12		04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	05	0.71	0.71	0.71	0.71	0.73		05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.13
	06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		07	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	08	0.47	0.47	0.47	0.47	0.48		08	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		09	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.04	0.04	0.04	0.04	0.11
リアライゼーション 毎の平均	HR01P	0.13	0.13	0.14	0.13	0.20	処分孔1孔あたりの平均	HR01P	0.19	0.19	0.19	0.19	0.23
	HR02P	0.10	0.10	0.11	0.10	0.14		最大値	4.36	4.36	4.36	4.36	4.84
	HR03P	0.05	0.05	0.05	0.05	0.08		最小値	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	HR04P	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04							
	HR05P	0.13	0.13	0.13	0.13	0.15							
	HR06P	0.08	0.08	0.08	0.09	0.15							
	HR07P	0.35	0.35	0.36	0.36	0.40							
	HR08P	0.85	0.85	0.85	0.85	0.96							
	HR09P	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07							
	HR10P	0.10	0.10	0.11	0.11	0.14							



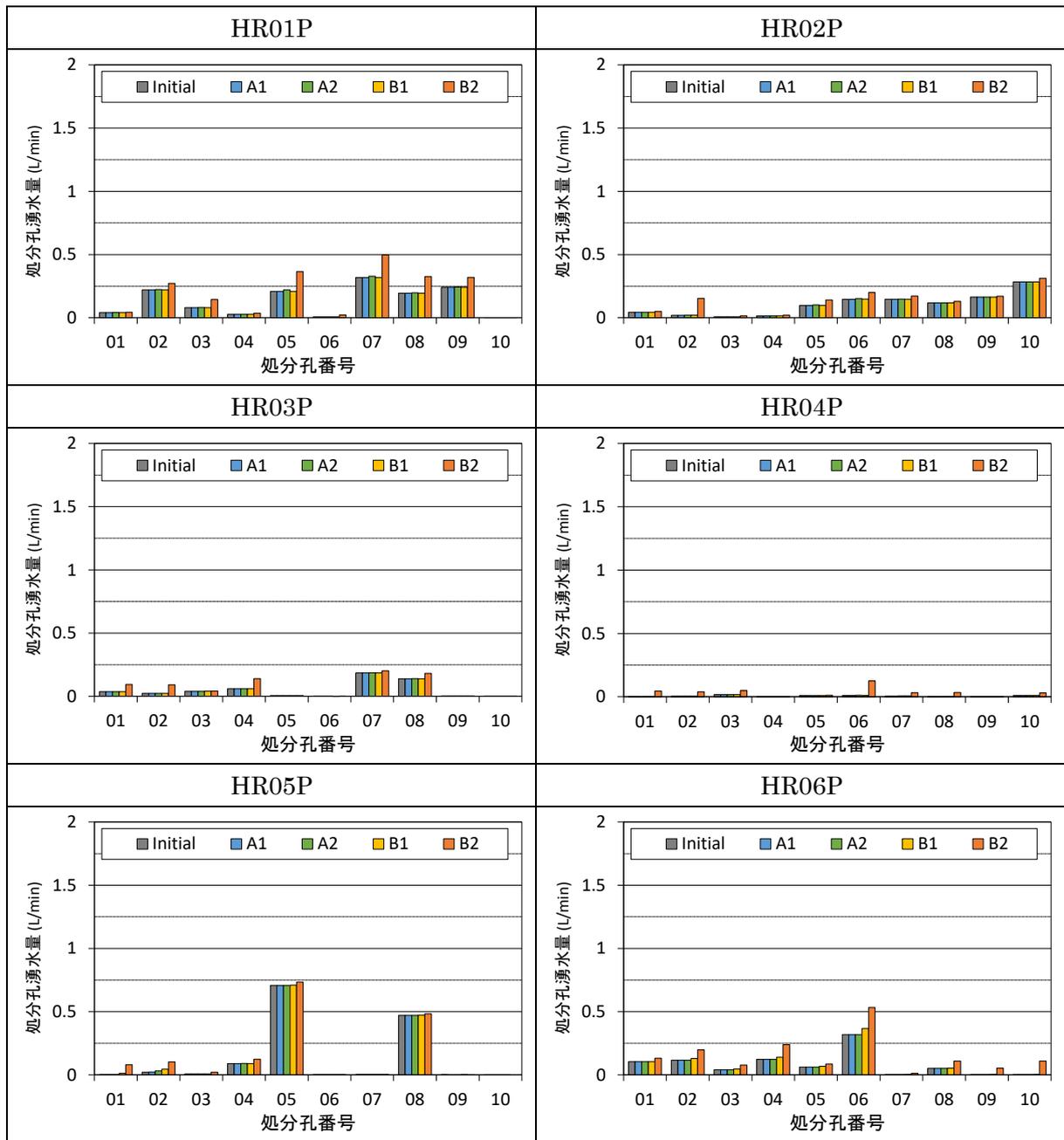


図 5.1.2-33 定置・埋戻し後の処分孔湧水量 (G3 処分坑道) (1)

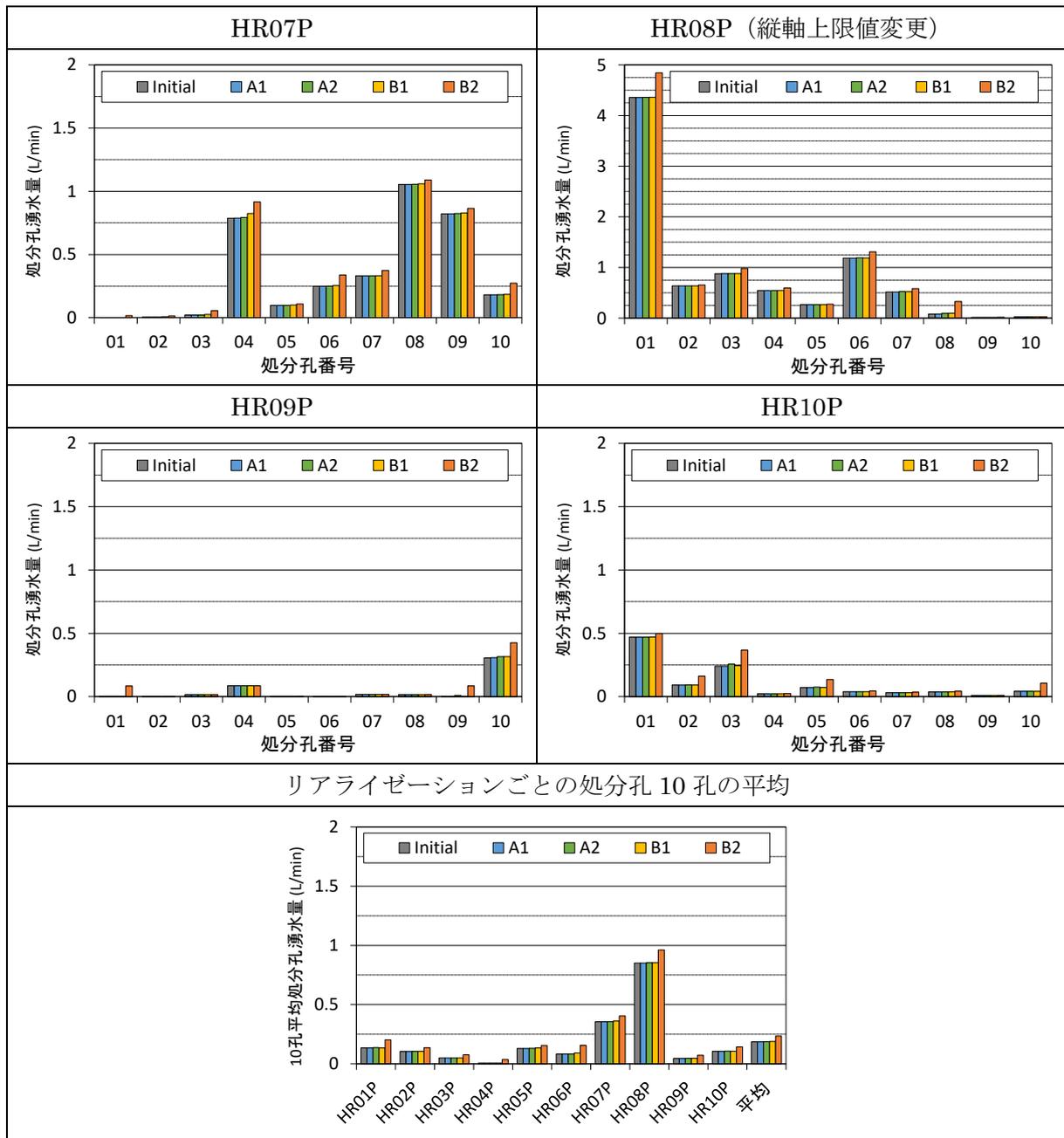


図 5.1.2-34 定置・埋戻し後の処分孔湧水量 (G3 処分坑道) (2)

表 5.1.2-13 定置・埋戻し後の処分孔湧水変動量算定結果 (G3 処分坑道)

G3	処分孔No.	処分孔湧水変動量 (L/min)				G3	処分孔No.	処分孔湧水変動量 (L/min)			
		A1	A2	B1	B2			A1	A2	B1	B2
HR01P	01	0.00	0.00	0.00	0.00	HR06P	01	0.00	0.00	0.00	0.03
	02	0.00	0.00	0.00	0.05		02	0.00	0.00	0.01	0.08
	03	0.00	0.00	0.00	0.06		03	0.00	0.00	0.01	0.04
	04	0.00	0.00	0.00	0.01		04	0.00	0.00	0.02	0.12
	05	0.00	0.01	0.00	0.16		05	0.00	0.00	0.01	0.02
	06	0.00	0.00	0.00	0.02		06	0.00	0.00	0.05	0.21
	07	0.00	0.01	0.00	0.18		07	0.00	0.00	0.00	0.01
	08	0.00	0.00	0.00	0.13		08	0.00	0.00	0.00	0.06
	09	0.00	0.00	0.00	0.08		09	0.00	0.00	0.00	0.05
	10	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.00	0.00	0.00	0.11
HR02P	01	0.00	0.00	0.00	0.01	HR07P	01	0.00	0.00	0.00	0.02
	02	0.00	0.00	0.00	0.13		02	0.00	0.00	0.00	0.01
	03	0.00	0.00	0.00	0.01		03	0.00	0.00	0.00	0.03
	04	0.00	0.00	0.00	0.01		04	0.00	0.01	0.04	0.13
	05	0.00	0.00	0.00	0.04		05	0.00	0.00	0.00	0.01
	06	0.00	0.01	0.00	0.05		06	0.00	0.00	0.01	0.09
	07	0.00	0.00	0.00	0.03		07	0.00	0.00	0.00	0.04
	08	0.00	0.00	0.00	0.01		08	0.00	0.00	0.01	0.04
	09	0.00	0.00	0.00	0.01		09	0.00	0.00	0.01	0.04
	10	0.00	0.00	0.00	0.03		10	0.00	0.00	0.00	0.09
HR03P	01	0.00	0.00	0.00	0.06	HR08P	01	0.00	0.00	0.01	0.49
	02	0.00	0.00	0.00	0.07		02	0.00	0.00	0.00	0.02
	03	0.00	0.00	0.00	0.00		03	0.00	0.00	0.00	0.10
	04	0.00	0.00	0.00	0.08		04	0.00	0.00	0.00	0.05
	05	0.00	0.00	0.00	0.00		05	0.00	0.00	0.00	0.01
	06	0.00	0.00	0.00	0.00		06	0.00	0.01	0.00	0.12
	07	0.00	0.00	0.00	0.02		07	0.00	0.01	0.01	0.07
	08	0.00	0.00	0.00	0.04		08	0.00	0.01	0.01	0.25
	09	0.00	0.00	0.00	0.00		09	0.00	0.00	0.00	0.00
	10	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.00	0.00	0.00	0.00
HR04P	01	0.00	0.00	0.00	0.04	HR09P	01	0.00	0.00	0.00	0.08
	02	0.00	0.00	0.00	0.03		02	0.00	0.00	0.00	0.00
	03	0.00	0.00	0.00	0.03		03	0.00	0.00	0.00	0.00
	04	0.00	0.00	0.00	0.00		04	0.00	0.00	0.00	0.00
	05	0.00	0.00	0.00	0.00		05	0.00	0.00	0.00	0.00
	06	0.00	0.00	0.00	0.12		06	0.00	0.00	0.00	0.00
	07	0.00	0.00	0.00	0.03		07	0.00	0.00	0.00	0.00
	08	0.00	0.00	0.00	0.03		08	0.00	0.00	0.00	0.00
	09	0.00	0.00	0.00	0.00		09	0.00	0.01	0.00	0.08
	10	0.00	0.00	0.00	0.02		10	0.00	0.01	0.01	0.12
HR05P	01	0.00	0.00	0.01	0.08	HR10P	01	0.00	0.00	0.00	0.03
	02	0.00	0.01	0.02	0.08		02	0.00	0.00	0.00	0.07
	03	0.00	0.00	0.00	0.01		03	0.00	0.02	0.01	0.13
	04	0.00	0.00	0.00	0.04		04	0.00	0.00	0.00	0.00
	05	0.00	0.00	0.00	0.03		05	0.00	0.00	0.00	0.06
	06	0.00	0.00	0.00	0.00		06	0.00	0.00	0.00	0.01
	07	0.00	0.00	0.00	0.00		07	0.00	0.00	0.00	0.00
	08	0.00	0.00	0.00	0.01		08	0.00	0.00	0.00	0.01
	09	0.00	0.00	0.00	0.00		09	0.00	0.00	0.00	0.00
	10	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.00	0.00	0.00	0.06
リアライ ゼーション 毎の平均						HR01P	0.00	0.00	0.00	0.07	
						HR02P	0.00	0.00	0.00	0.03	
						HR03P	0.00	0.00	0.00	0.03	
						HR04P	0.00	0.00	0.00	0.03	
						HR05P	0.00	0.00	0.00	0.02	
						HR06P	0.00	0.00	0.01	0.07	
						HR07P	0.00	0.00	0.01	0.05	
						HR08P	0.00	0.00	0.00	0.11	
						HR09P	0.00	0.00	0.00	0.03	
						HR10P	0.00	0.00	0.00	0.04	
処分孔1孔あたりの平均		0.00	0.00	0.00	0.05						
最大値		0.00	0.02	0.05	0.49						
最小値		0.00	0.00	0.00	0.00						



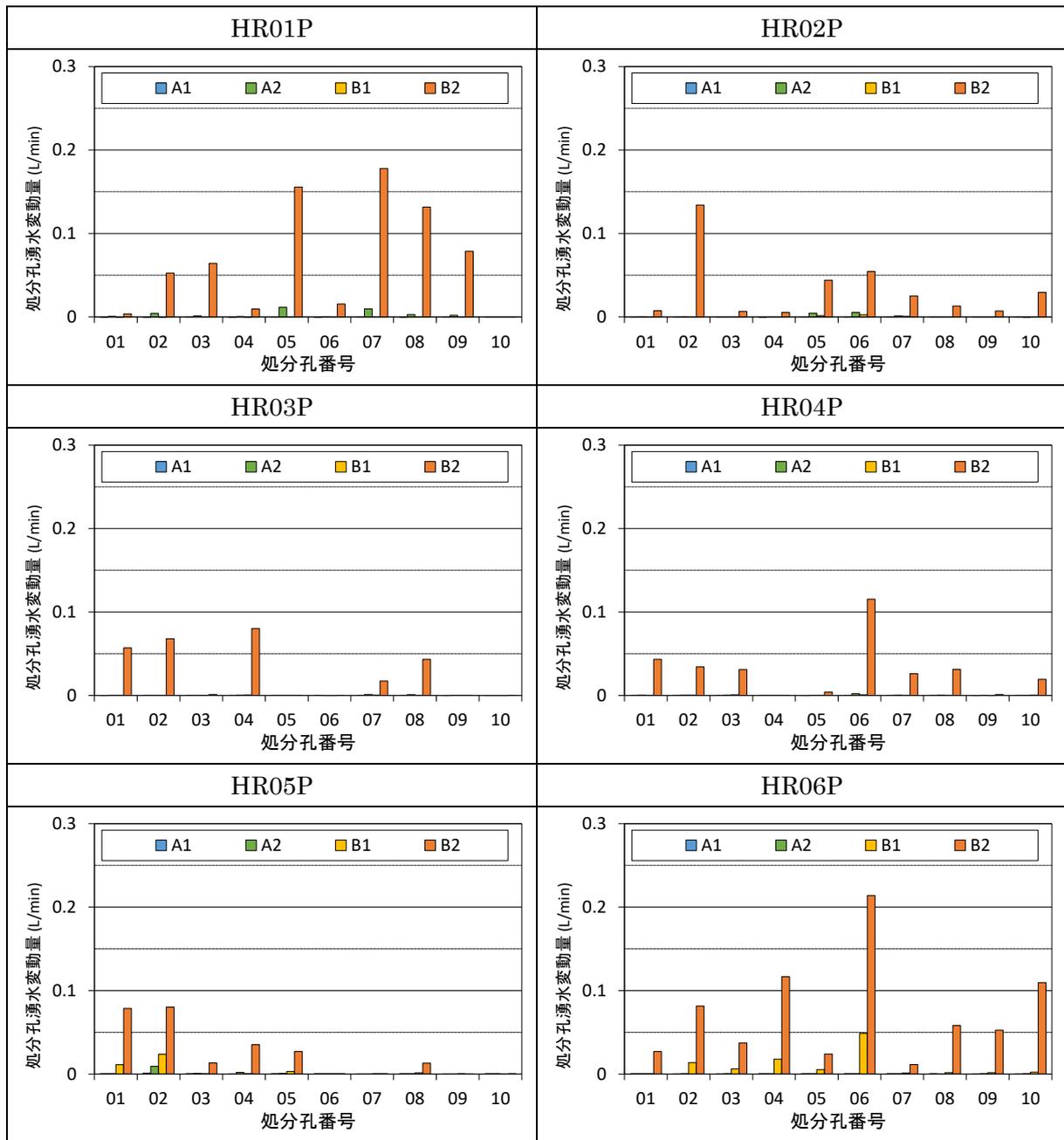


図 5.1.2-35 定置・埋戻し後の処分孔湧水変動量 (G3 処分坑道) (1)

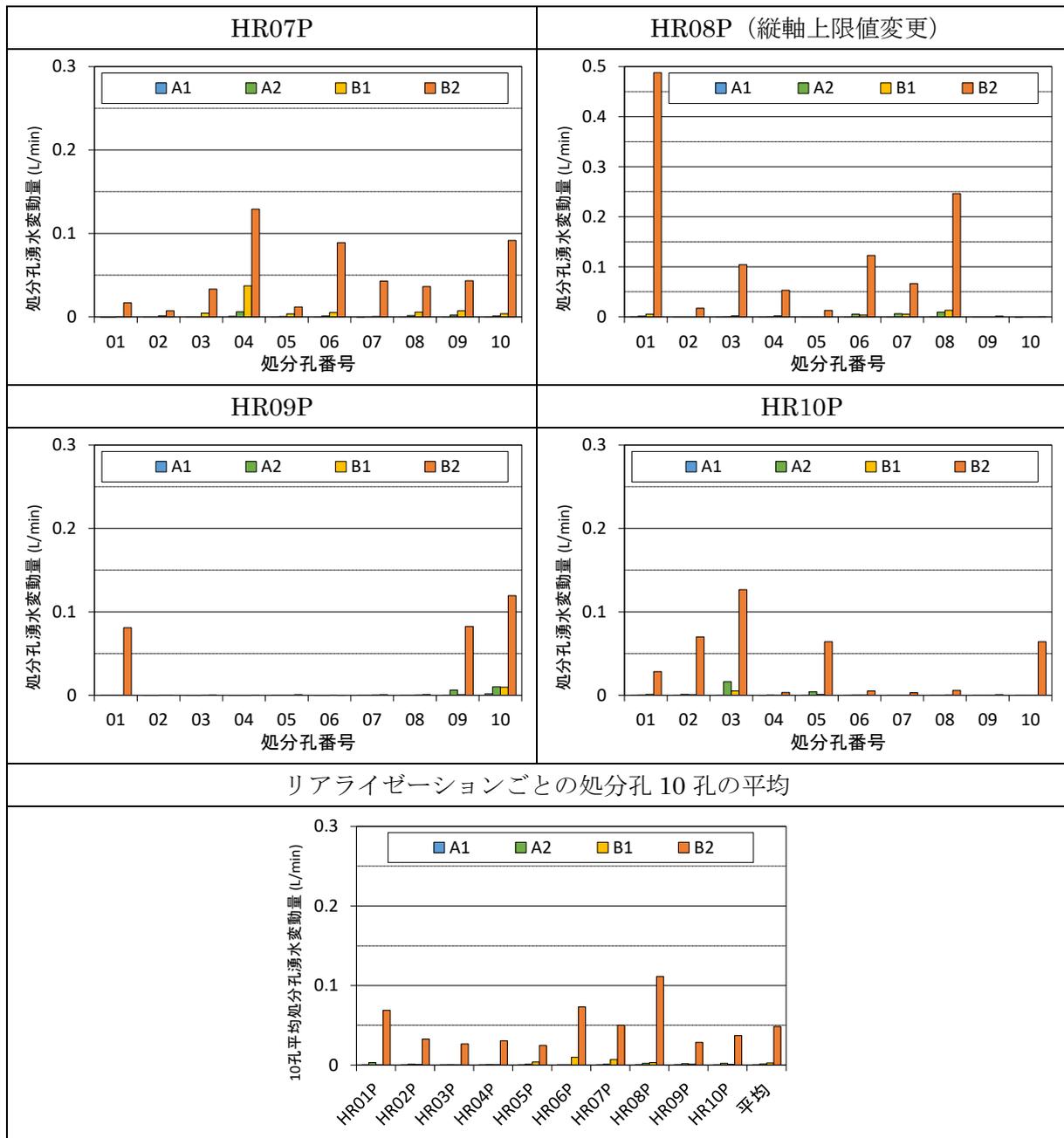
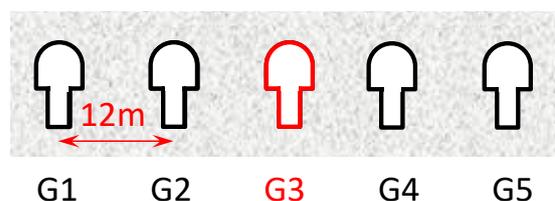


図 5.1.2-36 定置・埋戻し後の処分孔湧水変動量 (G3 処分坑道) (2)

表 5.1.2-14 定置・埋戻し後の処分孔湧水変動倍率算定結果 (G3 処分坑道)

G3	処分孔No.	処分孔湧水変動倍率 (倍)				G3	処分孔No.	処分孔湧水変動倍率 (倍)			
		A1	A2	B1	B2			A1	A2	B1	B2
HR01P	01	1.00	1.02	1.00	1.09	HR06P	01	1.00	1.00	1.00	1.26
	02	1.00	1.02	1.00	1.24		02	1.00	1.00	1.12	1.71
	03	1.00	1.01	1.00	1.81		03	1.00	1.00	1.15	1.92
	04	1.00	1.02	1.00	1.36		04	1.00	1.00	1.15	1.95
	05	1.00	1.06	1.00	1.75		05	1.00	1.00	1.08	1.39
	06	-	-	-	-		06	1.00	1.00	1.15	1.67
	07	1.00	1.03	1.00	1.56		07	-	-	-	-
	08	1.00	1.01	1.00	1.68		08	1.00	1.00	1.03	2.13
	09	1.00	1.01	1.00	1.33		09	-	-	-	-
	10	-	-	-	-		10	-	-	-	-
HR02P	01	1.00	1.01	1.01	1.17	HR07P	01	-	-	-	-
	02	1.00	1.02	1.01	7.89		02	-	-	-	-
	03	-	-	-	-		03	1.00	1.00	1.21	2.54
	04	1.00	1.01	1.01	1.35		04	1.00	1.01	1.05	1.16
	05	1.00	1.05	1.02	1.45		05	1.00	1.01	1.04	1.12
	06	1.00	1.04	1.02	1.38		06	1.00	1.00	1.02	1.36
	07	1.00	1.01	1.00	1.17		07	1.00	1.00	1.00	1.13
	08	1.00	1.00	1.00	1.11		08	1.00	1.00	1.01	1.03
	09	1.00	1.00	1.00	1.04		09	1.00	1.00	1.01	1.05
	10	1.00	1.00	1.00	1.10		10	1.00	1.01	1.02	1.50
HR03P	01	1.00	1.00	1.00	2.54	HR08P	01	1.00	1.00	1.00	1.11
	02	1.00	1.00	1.01	3.89		02	1.00	1.00	1.00	1.03
	03	1.00	1.00	1.00	1.03		03	1.00	1.00	1.00	1.12
	04	1.00	1.00	1.01	2.34		04	1.00	1.00	1.00	1.10
	05	-	-	-	-		05	1.00	1.00	1.00	1.05
	06	-	-	-	-		06	1.00	1.00	1.00	1.10
	07	1.00	1.01	1.00	1.09		07	1.00	1.01	1.01	1.13
	08	1.00	1.01	1.00	1.31		08	1.01	1.11	1.16	4.01
	09	-	-	-	-		09	1.00	1.00	1.00	1.09
	10	-	-	-	-		10	1.00	1.00	1.00	1.02
HR04P	01	-	-	-	-	HR09P	01	-	-	-	-
	02	-	-	-	-		02	-	-	-	-
	03	1.01	1.02	1.04	2.84		03	1.00	1.00	1.00	1.02
	04	-	-	-	-		04	1.00	1.00	1.00	1.00
	05	-	-	-	-		05	-	-	-	-
	06	-	-	-	-		06	-	-	-	-
	07	-	-	-	-		07	1.00	1.01	1.02	1.04
	08	-	-	-	-		08	1.01	1.01	1.03	1.07
	09	-	-	-	-		09	-	-	-	-
	10	1.00	1.01	1.03	2.83		10	1.01	1.03	1.03	1.39
HR05P	01	-	-	-	-	HR10P	01	1.00	1.00	1.00	1.06
	02	1.04	1.42	2.09	4.68		02	1.00	1.01	1.01	1.77
	03	-	-	-	-		03	1.00	1.07	1.02	1.53
	04	1.00	1.02	1.00	1.40		04	1.00	1.02	1.01	1.16
	05	1.00	1.00	1.00	1.04		05	1.00	1.06	1.01	1.91
	06	-	-	-	-		06	1.00	1.01	1.01	1.13
	07	-	-	-	-		07	1.00	1.00	1.01	1.10
	08	1.00	1.00	1.00	1.03		08	1.00	1.01	1.01	1.16
	09	-	-	-	-		09	-	-	-	-
	10	-	-	-	-		10	1.00	1.01	1.00	2.56
						リアライ ゼーション 毎の平均	HR01P	1.00	1.02	1.00	1.47
							HR02P	1.00	1.01	1.01	1.96
							HR03P	1.00	1.00	1.00	2.04
							HR04P	1.00	1.02	1.04	2.84
							HR05P	1.01	1.11	1.27	2.03
							HR06P	1.00	1.00	1.10	1.72
							HR07P	1.00	1.00	1.04	1.36
							HR08P	1.00	1.01	1.02	1.38
							HR09P	1.00	1.01	1.02	1.10
							HR10P	1.00	1.02	1.01	1.49
						処分孔1孔あたりの平均	1.00	1.02	1.05	1.74	
						最大値	1.04	1.42	2.09	7.89	
						最小値	1.00	1.00	1.00	1.00	



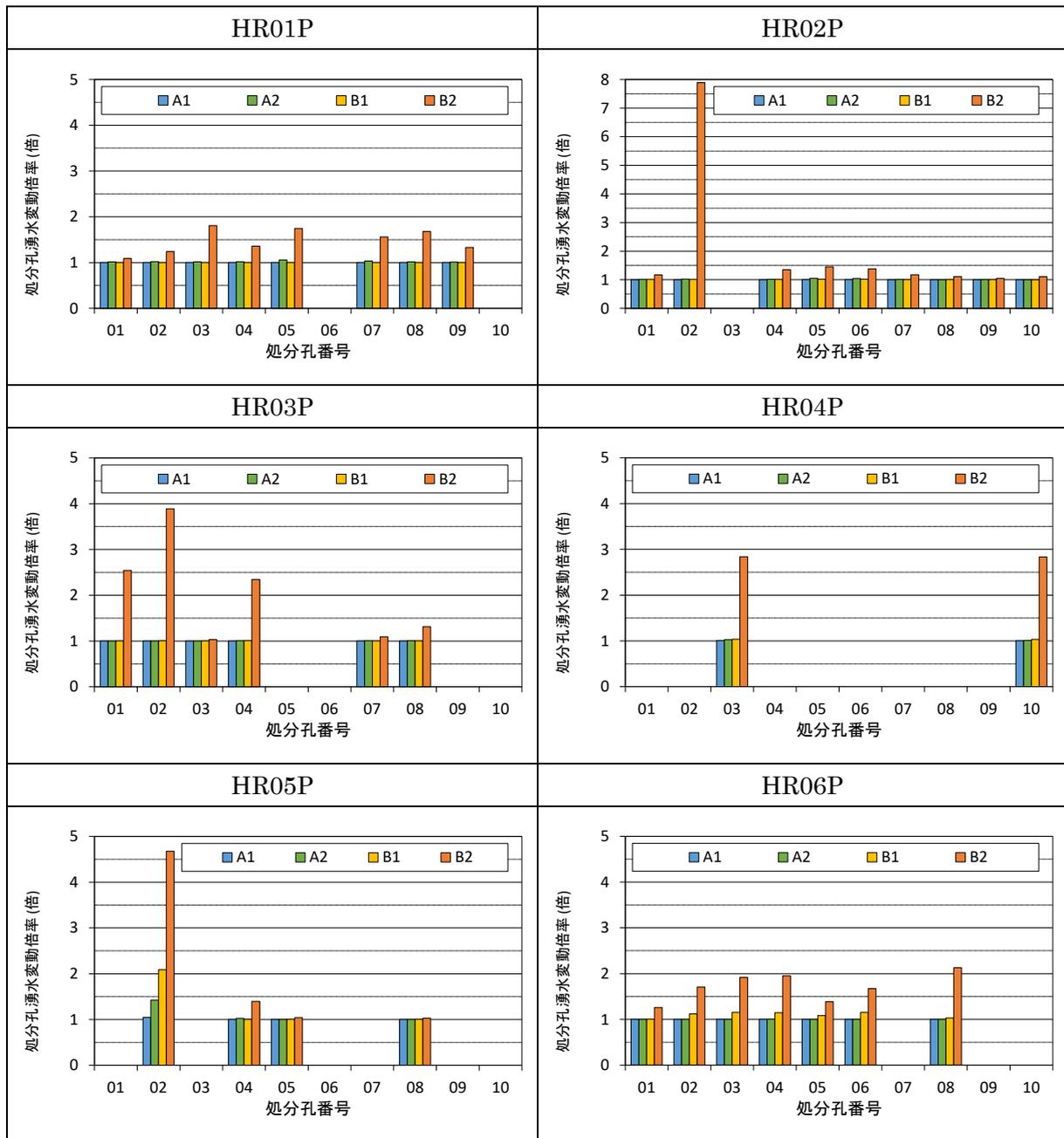


図 5.1.2-37 定置・埋戻し後の処分孔湧水変動倍率 (G3 処分坑道) (1)

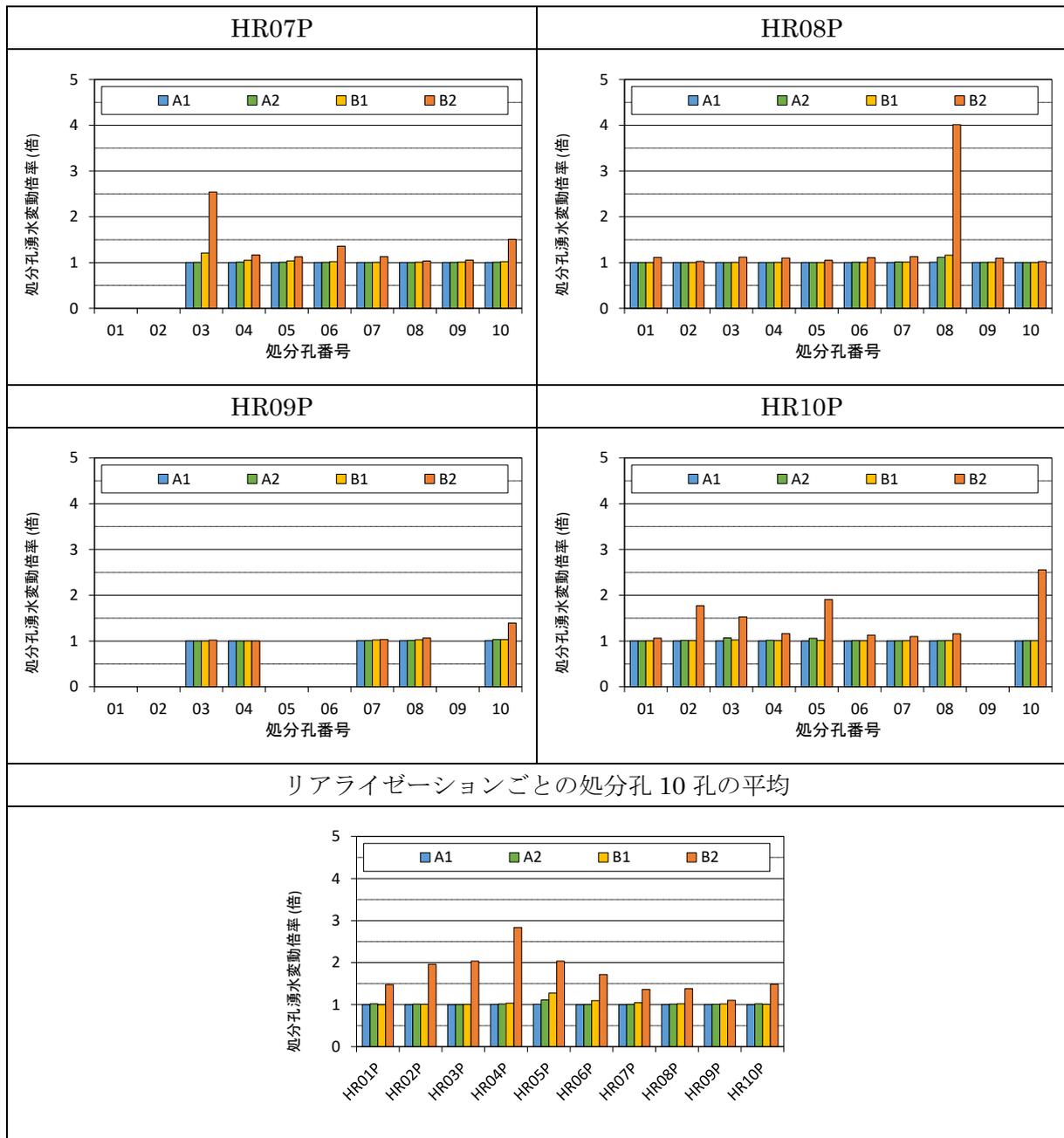


図 5.1.2-38 定置・埋戻し後の処分孔湧水変動倍率 (G3 処分坑道) (2)

表 5.1.2-15 G3 処分坑道における各解析ケースでの超過孔数

G3	処分孔湧水量0.63L/min以上の処分孔数				
	Initial	A1	A2	B1	B2
HR01P	0	0	0	0	0
HR02P	0	0	0	0	0
HR03P	0	0	0	0	0
HR04P	0	0	0	0	0
HR05P	1	1	1	1	1
HR06P	0	0	0	0	0
HR07P	3	3	3	3	3
HR08P	4	4	4	4	4
HR09P	0	0	0	0	0
HR10P	0	0	0	0	0
合計	8	8	8	8	8

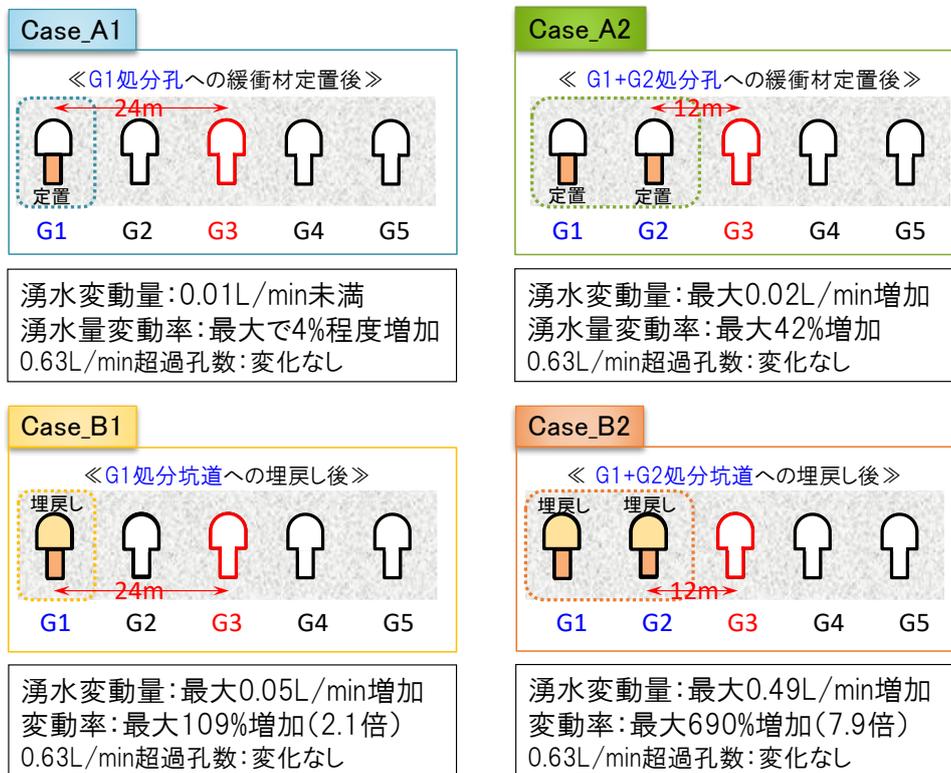


図 5.1.2-39 定置・埋戻しを行った場合の各ケースにおける G3 処分孔湧水量の変化のまとめ

b G2 処分坑道

G2 処分坑道に位置する処分孔の湧水変動は、定置・埋戻しの対象となる処分坑道 (G1) がモデル境界に近いことから境界条件の影響を受けることが想定される。そこでここでは参考として G2 処分坑道における処分孔湧水量、湧水変動量、湧水変動倍率の算定結果を整理する。湧水量の算定結果を表 5.1.2-16、図 5.1.2-40、図 5.1.2-41 に、湧水変動量の結果を表 5.1.2-17、図 5.1.2-42、図 5.1.2-43 に、湧水変動倍率の結果を表 5.1.2-18、図 5.1.2-44、図 5.1.2-45 にそれぞれ示す。また、図 5.1.2-46 に処分孔湧水挙動の結果をまとめる。

- 定置・埋戻し掘削前

処分孔掘削後の状態である Case_Initial では、処分孔湧水量は 0.00～1.22L/min であり、処分孔 1 孔あたりの平均では 0.07L/min であった。

- 施工順序 A（定置を先行したケース）

隣接処分坑道（G1）の緩衝材定置を行う Case_A1 では、湧水量の変化はほとんどなく、平均では 0.07L/min のままであった。湧水増加量としては 1 孔あたりの平均としては 0.00L/min であったが、最大で 0.29L/min となる処分孔（HR09P の処分孔 10）も確認された。湧水変動倍率としては Case_A2 の平均で 1.06 倍（6%の増加）、最大でも 1.42 倍（42%の増加）であった。

- 施工順序 B（定置後すぐに埋戻しをしたケース）

一方で、隣接の処分坑道（G2）まで埋戻しを行う Case_B2 では、湧水量は 0.00～2.60L/min であり、処分孔 1 孔あたりの平均では 0.12L/min に増加した。湧水変動量としては最大で 1.38L/min 増加する処分孔（HR09P の処分孔 10）も確認された。また変動倍率としては平均で 2.36 倍であり、最大 7.56 倍（0.00L/min から 0.10L/min に増加）となる処分孔も確認された。

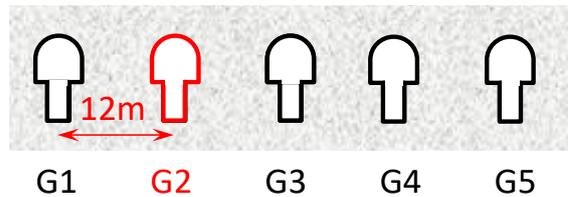
- 許容湧水量を超過する処分孔の孔数

G2 坑道において許容湧水量 0.63L/min を超過した処分孔の孔数（超過孔数）を表 5.1.2-19 に示す。Case_Initial では超過孔数は合計で 1 孔であったが、隣接坑道を埋め戻した Case_B1 では合計で 3 孔増加し 4 孔となった。この時、これら 3 つの湧水増加量はそれぞれ 0.16L/min、0.68L/min、0.43L/min であった。

G2 処分坑道における Case_A1、Case_B2 の湧水変動傾向は、平均的な値としては G3 処分坑道における Case_A2、Case_B2（隣接坑道の定置・埋戻しを行う条件）の結果と概ね同等であった。ただし、G2 処分坑道の方が最大の変動量や超過孔数が大きい結果である。これは、Case_B1 では境界条件の影響を受けている G1 処分坑道を埋め戻しているため、埋戻し箇所からの距離が同一であっても、湧水変動が大きくなったことが考えられる。

表 5.1.2-16 定置・埋戻し後の処分孔湧水量算定結果 (G2 処分坑道)

G2	処分孔No.	処分孔湧水量 (L/min)					G2	処分孔No.	処分孔湧水量 (L/min)				
		Initial	A1	A2	B1	B2			Initial	A1	A2	B1	B2
HR01P	01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	HR06P	01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
	02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		02	0.02	0.02	0.00	0.05	0.00
	03	0.04	0.04	0.00	0.04	0.00		03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	04	0.06	0.06	0.00	0.06	0.00		04	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
	05	0.16	0.16	0.00	0.16	0.00		05	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00
	06	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00		06	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00
	07	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00		07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	08	0.11	0.11	0.00	0.11	0.00		08	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00
	09	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00		09	0.01	0.01	0.00	0.07	0.00
	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.04	0.04	0.00	0.16	0.00
HR02P	01	0.06	0.06	0.00	0.16	0.00	HR07P	01	0.01	0.01	0.00	0.10	0.00
	02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00		02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
	03	0.10	0.10	0.00	0.14	0.00		03	0.04	0.06	0.00	0.28	0.00
	04	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00		04	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00
	05	0.03	0.03	0.00	0.03	0.00		05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	06	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00		06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	07	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00		07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		08	0.40	0.40	0.00	1.08	0.00
	09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	10	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00		10	0.49	0.49	0.00	0.92	0.00
HR03P	01	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	HR08P	01	0.05	0.05	0.00	0.08	0.00
	02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		02	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00
	03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		03	0.08	0.11	0.00	0.24	0.00
	04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		04	0.03	0.03	0.00	0.06	0.00
	05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		05	0.12	0.12	0.00	0.13	0.00
	06	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00		06	0.01	0.02	0.00	0.04	0.00
	07	0.05	0.05	0.00	0.05	0.00		07	0.19	0.20	0.00	0.28	0.00
	08	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00		08	0.09	0.09	0.00	0.15	0.00
	09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		09	0.06	0.07	0.00	0.09	0.00
	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.14	0.14	0.00	0.25	0.00
HR04P	01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	HR09P	01	0.13	0.13	0.00	0.23	0.00
	02	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00		02	0.02	0.02	0.00	0.03	0.00
	03	0.03	0.03	0.00	0.04	0.00		03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	05	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00		05	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
	06	0.33	0.33	0.00	0.40	0.00		06	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
	07	0.13	0.13	0.00	0.14	0.00		07	0.01	0.02	0.00	0.08	0.00
	08	0.09	0.09	0.00	0.10	0.00		08	0.01	0.02	0.00	0.04	0.00
	09	0.01	0.01	0.00	0.04	0.00		09	0.02	0.03	0.00	0.06	0.00
	10	0.02	0.02	0.00	0.08	0.00		10	1.22	1.50	0.00	2.60	0.00
HR05P	01	0.01	0.01	0.00	0.04	0.00	HR10P	01	0.02	0.02	0.00	0.07	0.00
	02	0.05	0.06	0.00	0.23	0.00		02	0.15	0.15	0.00	0.23	0.00
	03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	04	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00		04	0.05	0.05	0.00	0.06	0.00
	05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		05	0.12	0.12	0.00	0.17	0.00
	06	0.03	0.03	0.00	0.03	0.00		06	0.27	0.27	0.00	0.42	0.00
	07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		07	0.04	0.04	0.00	0.17	0.00
	08	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00		08	0.08	0.08	0.00	0.14	0.00
	09	0.46	0.47	0.00	0.62	0.00		09	0.09	0.09	0.00	0.28	0.00
	10	0.59	0.59	0.00	0.66	0.00		10	0.04	0.04	0.00	0.09	0.00
							リアライ ゼーション 毎の平均	HR01P	0.04	0.04	0.00	0.04	0.00
								HR02P	0.02	0.02	0.00	0.04	0.00
								HR03P	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00
								HR04P	0.06	0.06	0.00	0.09	0.00
								HR05P	0.12	0.12	0.00	0.16	0.00
								HR06P	0.01	0.01	0.00	0.04	0.00
								HR07P	0.10	0.10	0.00	0.24	0.00
								HR08P	0.08	0.08	0.00	0.13	0.00
								HR09P	0.14	0.17	0.00	0.31	0.00
								HR10P	0.09	0.09	0.00	0.16	0.00
							処分孔1孔あたりの平均	0.07	0.07	0.00	0.12	0.00	
							最大値	1.22	1.50	0.00	2.60	0.00	
							最小値	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	



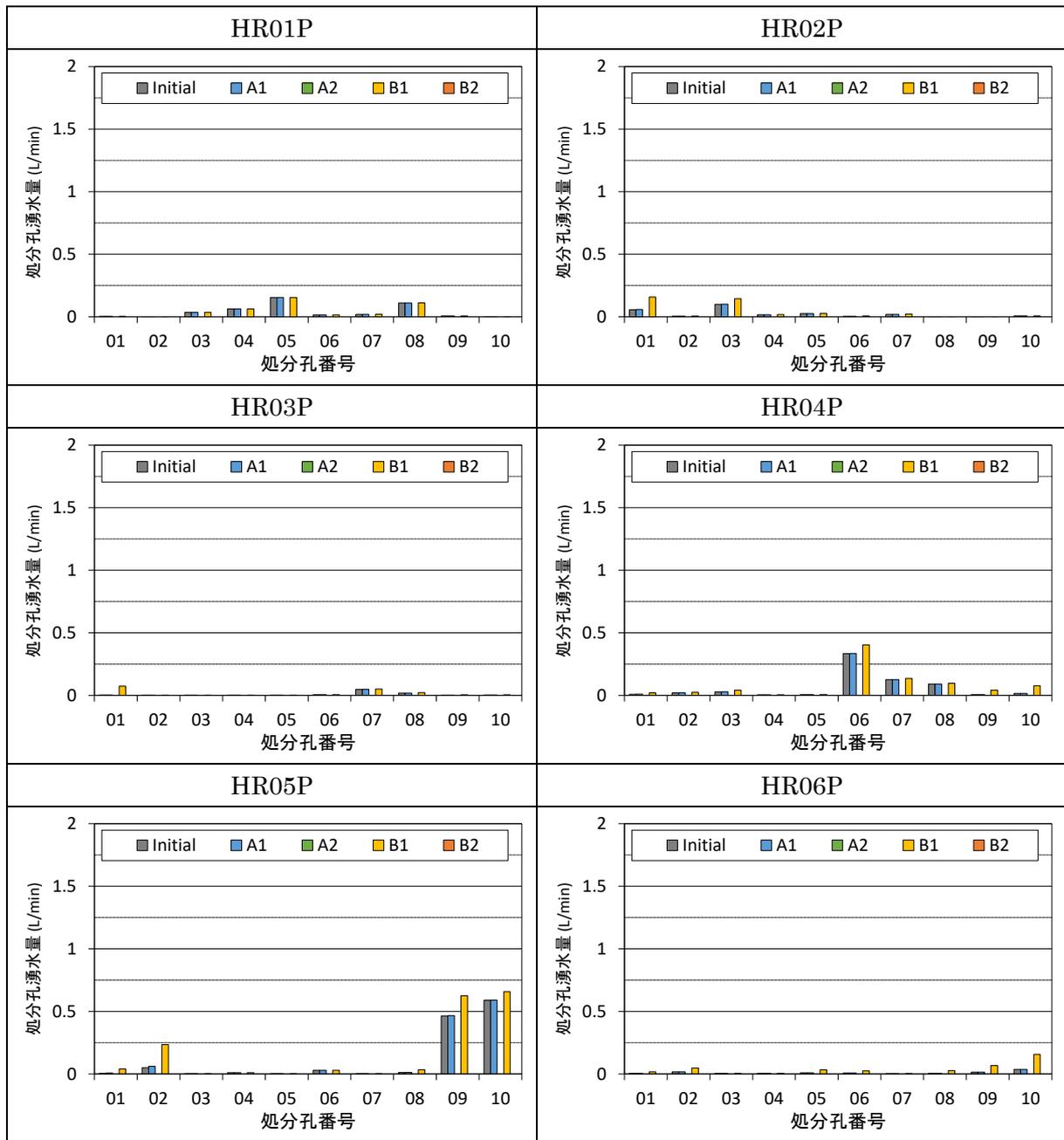


図 5.1.2-40 定置・埋戻し後の処分孔湧水量 (G2 処分坑道) (1)

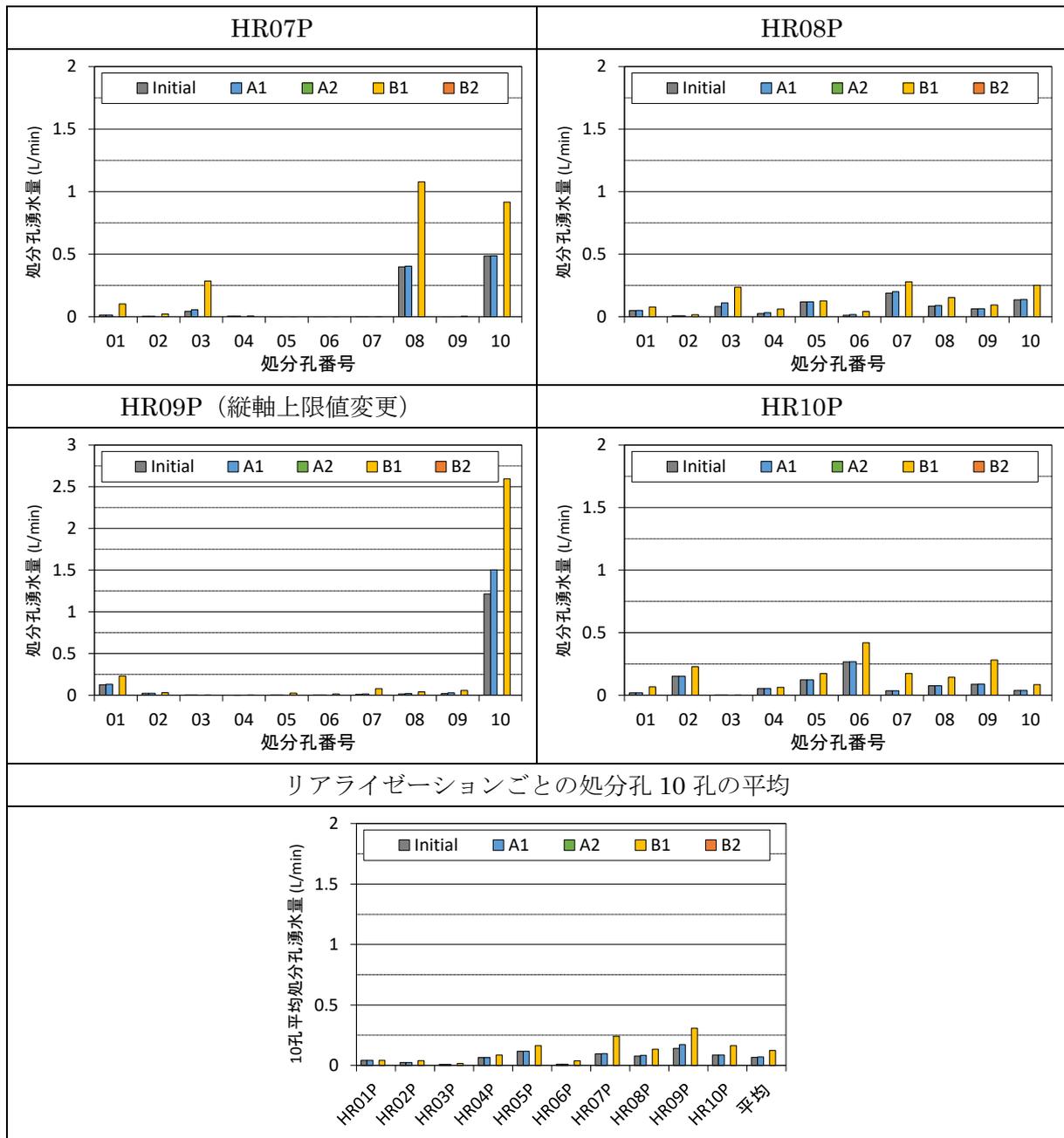
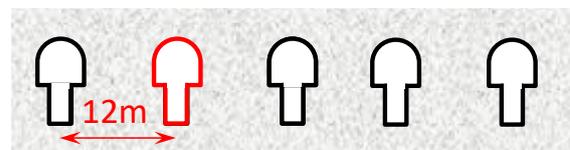


図 5.1.2-41 定置・埋戻し後の処分孔湧水量 (G2 処分坑道) (2)

表 5.1.2-17 定置・埋戻し後の処分孔湧水変動量算定結果 (G2 処分坑道)

G2	処分孔No.	処分孔湧水変動量 (L/min)				G2	処分孔No.	処分孔湧水変動量 (L/min)			
		A1	A2	B1	B2			A1	A2	B1	B2
HR01P	01	0.00	0.00	0.00	0.00	HR06P	01	0.00	0.00	0.01	0.00
	02	0.00	0.00	0.00	0.00		02	0.00	-0.02	0.03	-0.02
	03	0.00	-0.04	0.00	-0.04		03	0.00	0.00	0.00	0.00
	04	0.00	-0.06	0.00	-0.06		04	0.00	0.00	0.00	0.00
	05	0.00	-0.16	0.00	-0.16		05	0.00	-0.01	0.02	-0.01
	06	0.00	-0.02	0.00	-0.02		06	0.00	-0.01	0.02	-0.01
	07	0.00	-0.02	0.00	-0.02		07	0.00	0.00	0.00	0.00
	08	0.00	-0.11	0.00	-0.11		08	0.00	-0.01	0.02	-0.01
	09	0.00	-0.01	0.00	-0.01		09	0.00	-0.01	0.05	-0.01
	10	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.00	-0.04	0.12	-0.04
HR02P	01	0.00	-0.06	0.10	-0.06	HR07P	01	0.00	-0.01	0.09	-0.01
	02	0.00	-0.01	0.00	-0.01		02	0.00	0.00	0.02	0.00
	03	0.00	-0.10	0.04	-0.10		03	0.01	-0.04	0.24	-0.04
	04	0.00	-0.02	0.00	-0.02		04	0.00	-0.01	0.00	-0.01
	05	0.00	-0.03	0.00	-0.03		05	0.00	0.00	0.00	0.00
	06	0.00	0.00	0.00	0.00		06	0.00	0.00	0.00	0.00
	07	0.00	-0.02	0.00	-0.02		07	0.00	0.00	0.00	0.00
	08	0.00	0.00	0.00	0.00		08	0.00	-0.40	0.68	-0.40
	09	0.00	0.00	0.00	0.00		09	0.00	0.00	0.00	0.00
	10	0.00	-0.01	0.00	-0.01		10	0.00	-0.49	0.43	-0.49
HR03P	01	0.00	0.00	0.07	0.00	HR08P	01	0.00	-0.05	0.03	-0.05
	02	0.00	0.00	0.00	0.00		02	0.00	-0.01	0.01	-0.01
	03	0.00	0.00	0.00	0.00		03	0.03	-0.08	0.15	-0.08
	04	0.00	0.00	0.00	0.00		04	0.01	-0.03	0.04	-0.03
	05	0.00	0.00	0.00	0.00		05	0.00	-0.12	0.01	-0.12
	06	0.00	-0.01	0.00	-0.01		06	0.01	-0.01	0.03	-0.01
	07	0.00	-0.05	0.00	-0.05		07	0.01	-0.19	0.09	-0.19
	08	0.00	-0.02	0.00	-0.02		08	0.00	-0.09	0.07	-0.09
	09	0.00	0.00	0.00	0.00		09	0.00	-0.06	0.03	-0.06
	10	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.00	-0.14	0.12	-0.14
HR04P	01	0.00	-0.01	0.01	-0.01	HR09P	01	0.00	-0.13	0.10	-0.13
	02	0.00	-0.02	0.00	-0.02		02	0.00	-0.02	0.01	-0.02
	03	0.00	-0.03	0.01	-0.03		03	0.00	0.00	0.00	0.00
	04	0.00	0.00	0.00	0.00		04	0.00	0.00	0.00	0.00
	05	0.00	-0.01	0.00	-0.01		05	0.00	0.00	0.02	0.00
	06	0.00	-0.33	0.07	-0.33		06	0.00	0.00	0.01	0.00
	07	0.00	-0.13	0.01	-0.13		07	0.00	-0.01	0.07	-0.01
	08	0.00	-0.09	0.01	-0.09		08	0.01	-0.01	0.03	-0.01
	09	0.00	-0.01	0.03	-0.01		09	0.01	-0.02	0.04	-0.02
	10	0.00	-0.02	0.06	-0.02		10	0.29	-1.22	1.38	-1.22
HR05P	01	0.00	-0.01	0.03	-0.01	HR10P	01	0.00	-0.02	0.05	-0.02
	02	0.01	-0.05	0.19	-0.05		02	0.00	-0.15	0.08	-0.15
	03	0.00	0.00	0.00	0.00		03	0.00	0.00	0.00	0.00
	04	0.00	-0.01	0.00	-0.01		04	0.00	-0.05	0.01	-0.05
	05	0.00	0.00	0.00	0.00		05	0.00	-0.12	0.05	-0.12
	06	0.00	-0.03	0.00	-0.03		06	0.00	-0.27	0.15	-0.27
	07	0.00	0.00	0.00	0.00		07	0.00	-0.04	0.14	-0.04
	08	0.00	-0.01	0.02	-0.01		08	0.00	-0.08	0.07	-0.08
	09	0.00	-0.46	0.16	-0.46		09	0.00	-0.09	0.19	-0.09
	10	0.00	-0.59	0.07	-0.59		10	0.00	-0.04	0.05	-0.04
リアライゼーション 毎の平均	HR01P	0.00	-0.04	0.00	-0.04	HR01P	0.00	-0.04	0.00	-0.04	
	HR02P	0.00	-0.02	0.02	-0.02	HR02P	0.00	-0.02	0.02	-0.02	
	HR03P	0.00	-0.01	0.01	-0.01	HR03P	0.00	-0.01	0.01	-0.01	
	HR04P	0.00	-0.06	0.02	-0.06	HR04P	0.00	-0.06	0.02	-0.06	
	HR05P	0.00	-0.12	0.05	-0.12	HR05P	0.00	-0.12	0.05	-0.12	
	HR06P	0.00	-0.01	0.03	-0.01	HR06P	0.00	-0.01	0.03	-0.01	
	HR07P	0.00	-0.10	0.15	-0.10	HR07P	0.00	-0.10	0.15	-0.10	
	HR08P	0.01	-0.08	0.06	-0.08	HR08P	0.01	-0.08	0.06	-0.08	
	HR09P	0.03	-0.14	0.17	-0.14	HR09P	0.03	-0.14	0.17	-0.14	
	HR10P	0.00	-0.09	0.08	-0.09	HR10P	0.00	-0.09	0.08	-0.09	
処分孔1孔あたりの平均	0.00	-0.07	0.06	-0.07	処分孔1孔あたりの平均	0.00	-0.07	0.06	-0.07		
最大値	0.29	0.00	1.38	0.00	最大値	0.29	0.00	1.38	0.00		
最小値	0.00	-1.22	0.00	-1.22	最小値	0.00	-1.22	0.00	-1.22		



G1 G2 G3 G4 G5

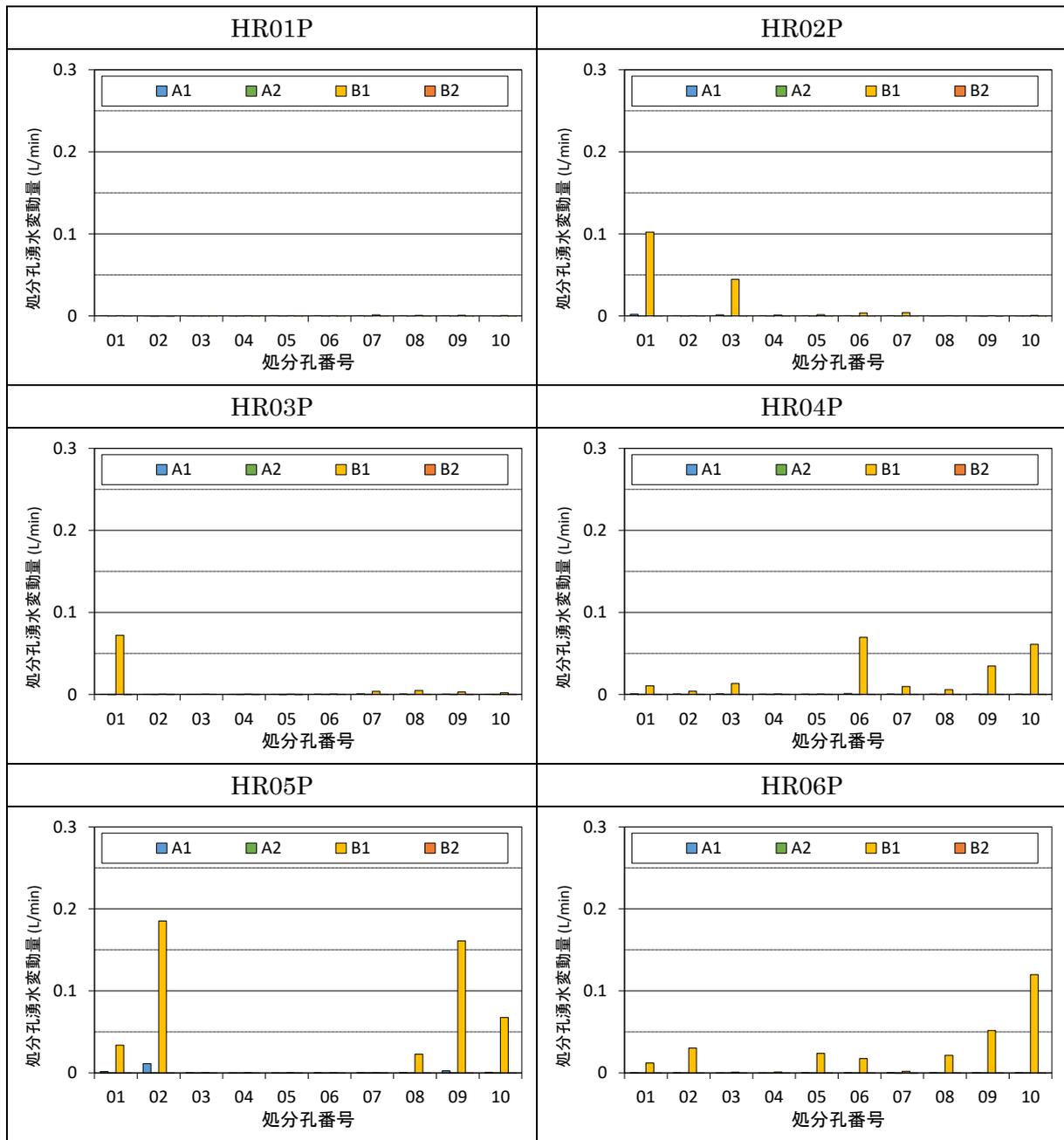


図 5.1.2-42 定置・埋戻し後の処分孔湧水変動量 (G2 処分坑道) (1)

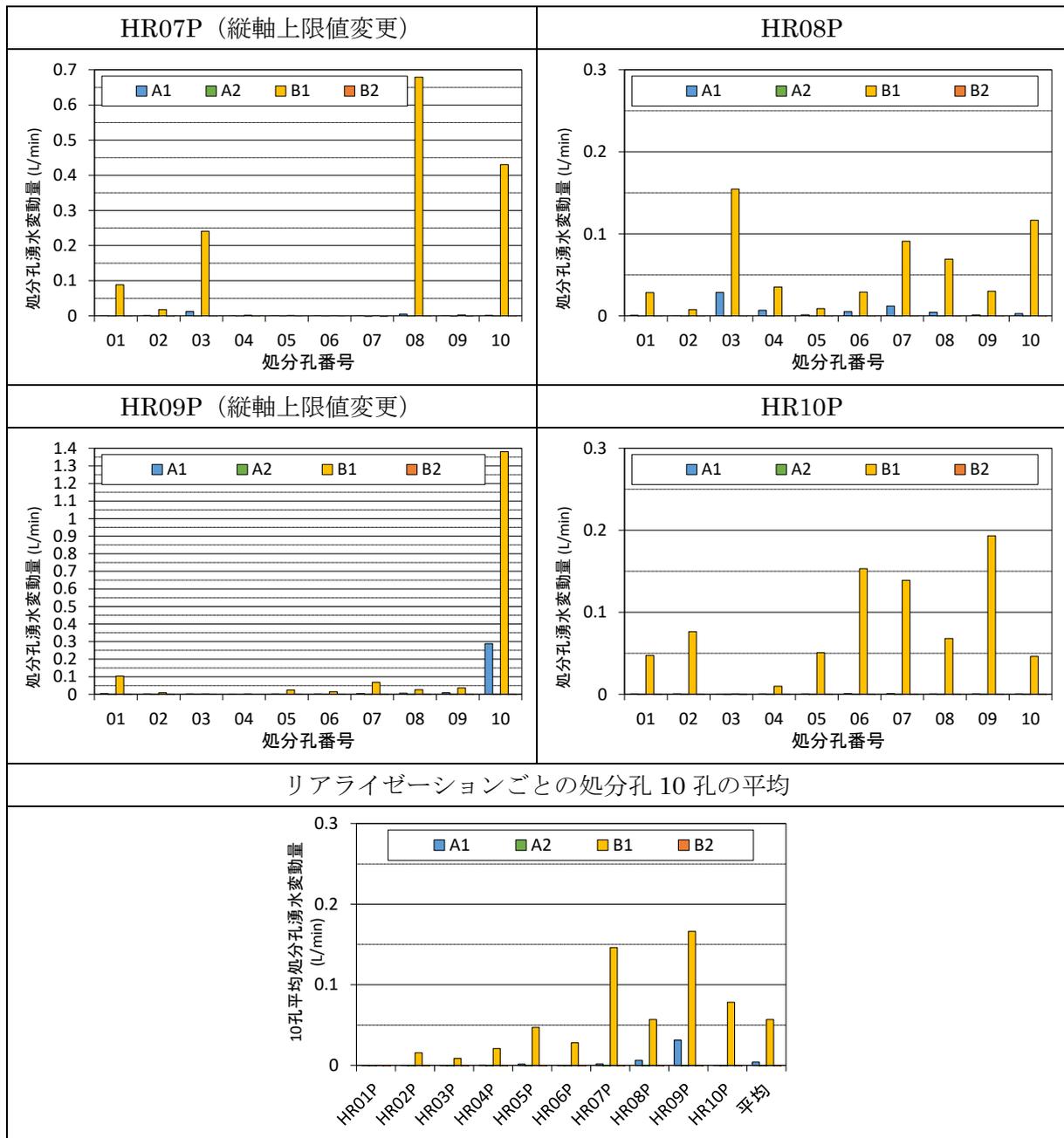
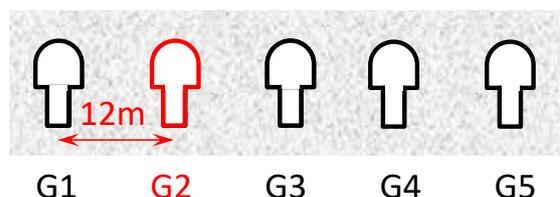


図 5.1.2-43 定置・埋戻し後の処分孔湧水変動量 (G2 処分坑道) (2)

表 5.1.2-18 定置・埋戻し後の処分孔湧水変動倍率算定結果 (G2 処分坑道)

G2	処分孔No.	処分孔湧水変動倍率(倍)				G2	処分孔No.	処分孔湧水変動倍率(倍)			
		A1	A2	B1	B2			A1	A2	B1	B2
HR01P	01	-	-	-	-	HR06P	01	-	-	-	-
	02	-	-	-	-		02	1.00	0.00	2.76	0.00
	03	1.00	0.00	1.00	0.00		03	-	-	-	-
	04	1.00	0.00	1.00	0.00		04	-	-	-	-
	05	1.00	0.00	1.00	0.00		05	-	-	-	-
	06	1.00	0.00	1.00	0.00		06	-	-	-	-
	07	1.00	0.00	1.07	0.00		07	-	-	-	-
	08	1.00	0.00	1.00	0.00		08	-	-	-	-
	09	-	-	-	-		09	1.00	0.00	4.52	0.00
	10	-	-	-	-		10	1.00	0.00	4.33	0.00
HR02P	01	1.03	0.00	2.81	0.00	HR07P	01	1.00	0.00	7.56	0.00
	02	-	-	-	-		02	-	-	-	-
	03	1.01	0.00	1.45	0.00		03	1.28	0.00	6.50	0.00
	04	1.00	0.00	1.05	0.00		04	-	-	-	-
	05	1.00	0.00	1.06	0.00		05	-	-	-	-
	06	-	-	-	-		06	-	-	-	-
	07	1.00	0.00	1.21	0.00		07	-	-	-	-
	08	-	-	-	-		08	1.01	0.00	2.70	0.00
	09	-	-	-	-		09	-	-	-	-
	10	-	-	-	-		10	1.00	0.00	1.89	0.00
HR03P	01	-	-	-	-	HR08P	01	1.01	0.00	1.56	0.00
	02	-	-	-	-		02	-	-	-	-
	03	-	-	-	-		03	1.35	0.00	2.89	0.00
	04	-	-	-	-		04	1.26	0.00	2.34	0.00
	05	-	-	-	-		05	1.01	0.00	1.07	0.00
	06	-	-	-	-		06	1.42	0.00	3.33	0.00
	07	1.01	0.00	1.08	0.00		07	1.06	0.00	1.48	0.00
	08	1.02	0.00	1.27	0.00		08	1.05	0.00	1.81	0.00
	09	-	-	-	-		09	1.02	0.00	1.47	0.00
	10	-	-	-	-		10	1.02	0.00	1.86	0.00
HR04P	01	-	-	-	-	HR09P	01	1.03	0.00	1.82	0.00
	02	1.02	0.00	1.19	0.00		02	1.02	0.00	1.36	0.00
	03	1.02	0.00	1.46	0.00		03	-	-	-	-
	04	-	-	-	-		04	-	-	-	-
	05	-	-	-	-		05	-	-	-	-
	06	1.00	0.00	1.21	0.00		06	-	-	-	-
	07	1.00	0.00	1.08	0.00		07	1.39	0.00	7.00	0.00
	08	1.00	0.00	1.06	0.00		08	1.41	0.00	2.80	0.00
	09	-	-	-	-		09	1.41	0.00	2.78	0.00
	10	1.01	0.00	4.87	0.00		10	1.24	0.00	2.14	0.00
HR05P	01	-	-	-	-	HR10P	01	1.01	0.00	3.48	0.00
	02	1.23	0.00	4.74	0.00		02	1.00	0.00	1.51	0.00
	03	-	-	-	-		03	-	-	-	-
	04	-	-	-	-		04	1.00	0.00	1.19	0.00
	05	-	-	-	-		05	1.00	0.00	1.41	0.00
	06	1.00	0.00	1.01	0.00		06	1.00	0.00	1.57	0.00
	07	-	-	-	-		07	1.03	0.00	4.89	0.00
	08	1.04	0.00	2.99	0.00		08	1.00	0.00	1.90	0.00
	09	1.01	0.00	1.35	0.00		09	1.00	0.00	3.20	0.00
	10	1.00	0.00	1.11	0.00		10	1.00	0.00	2.19	0.00
リアライ ゼーション 毎の平均	HR01P	1.00	0.00	1.01	0.00	HR01P	1.00	0.00	1.01	0.00	
	HR02P	1.01	0.00	1.51	0.00	HR02P	1.01	0.00	1.51	0.00	
	HR03P	1.02	0.00	1.18	0.00	HR03P	1.02	0.00	1.18	0.00	
	HR04P	1.01	0.00	1.81	0.00	HR04P	1.01	0.00	1.81	0.00	
	HR05P	1.05	0.00	2.24	0.00	HR05P	1.05	0.00	2.24	0.00	
	HR06P	1.00	0.00	3.87	0.00	HR06P	1.00	0.00	3.87	0.00	
	HR07P	1.07	0.00	4.66	0.00	HR07P	1.07	0.00	4.66	0.00	
	HR08P	1.13	0.00	1.98	0.00	HR08P	1.13	0.00	1.98	0.00	
	HR09P	1.25	0.00	2.98	0.00	HR09P	1.25	0.00	2.98	0.00	
	HR10P	1.01	0.00	2.37	0.00	HR10P	1.01	0.00	2.37	0.00	
処分孔1孔あたりの平均		1.06	0.00	2.36	0.00	処分孔1孔あたりの平均	1.06	0.00	2.36	0.00	
最大値		1.42	0.00	7.56	0.00	最大値	1.42	0.00	7.56	0.00	
最小値		1.00	0.00	1.00	0.00	最小値	1.00	0.00	1.00	0.00	



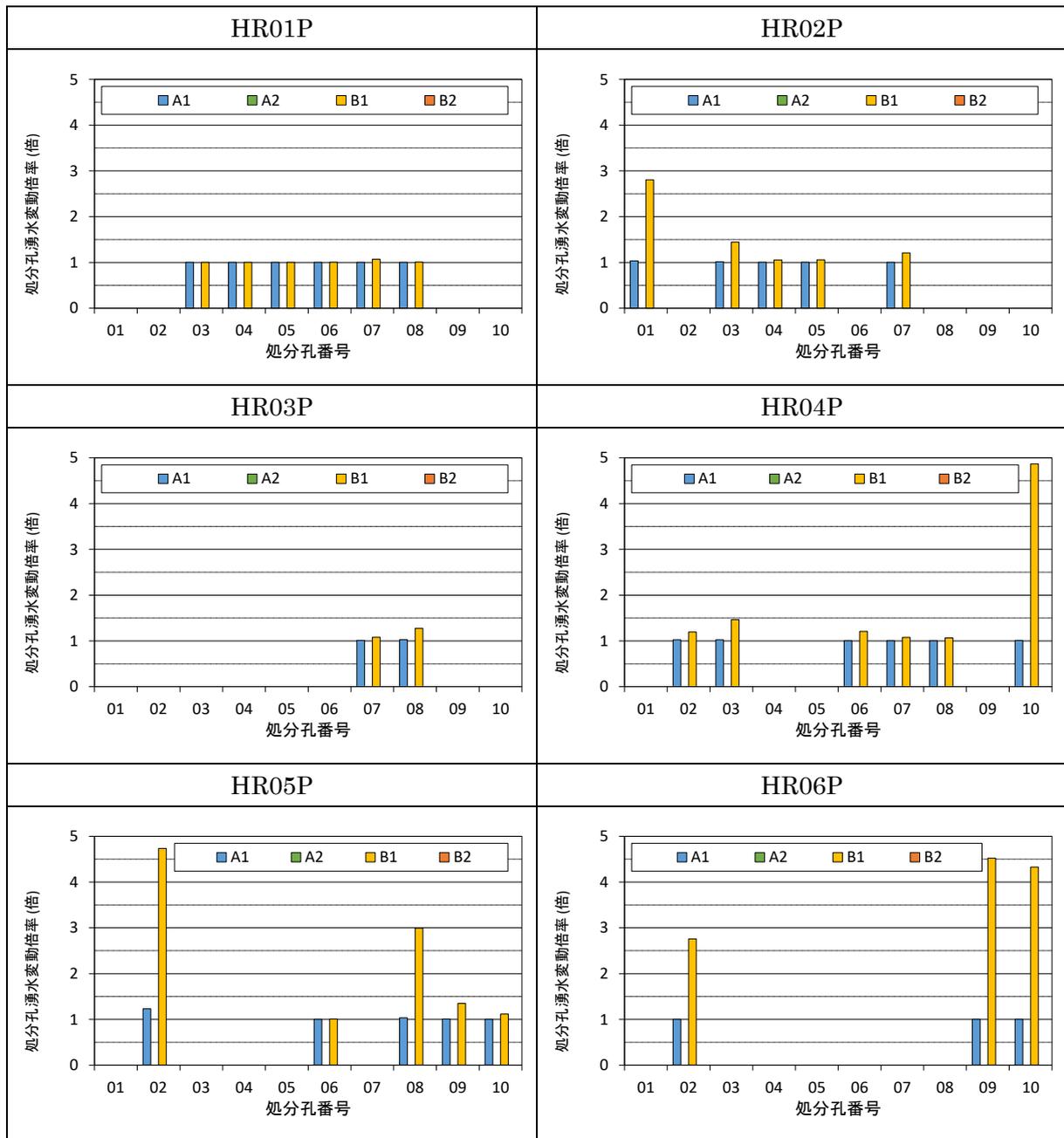


図 5.1.2-44 定置・埋戻し後の処分孔湧水変動倍率 (G2 処分坑道) (1)

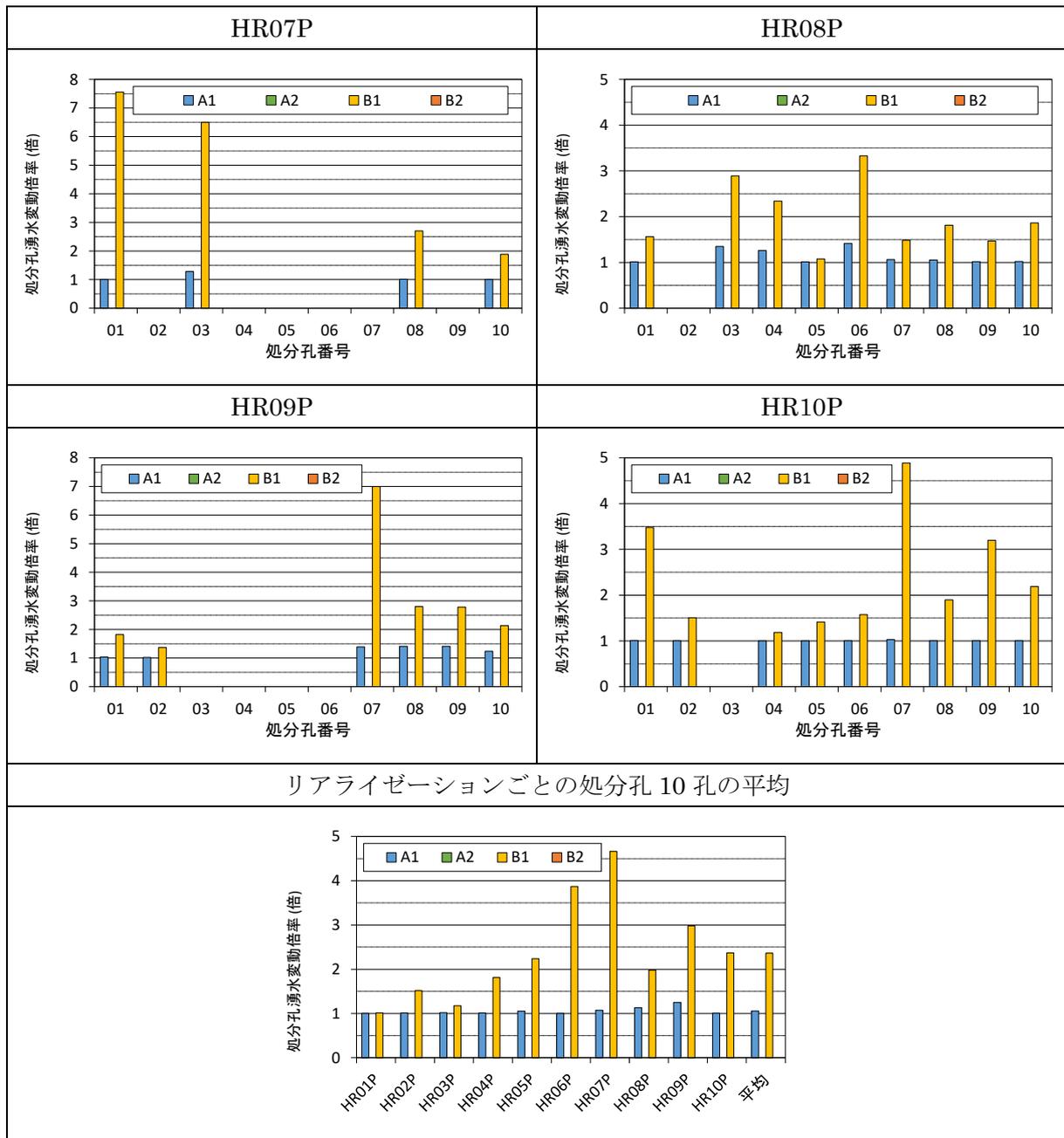


図 5.1.2-45 定置・埋戻し後の処分孔湧水変動倍率 (G2 処分坑道) (2)

表 5.1.2-19 G2 処分坑道における各解析ケースでの超過孔数

G2	処分孔湧水量0.63L/min以上の処分孔数				
	Initial	A1	A2	B1	B2
HR01P	0	0	0	0	0
HR02P	0	0	0	0	0
HR03P	0	0	0	0	0
HR04P	0	0	0	0	0
HR05P	0	0	0	1	0
HR06P	0	0	0	0	0
HR07P	0	0	0	2	0
HR08P	0	0	0	0	0
HR09P	1	1	0	1	0
HR10P	0	0	0	0	0
合計	1	1	0	4	0

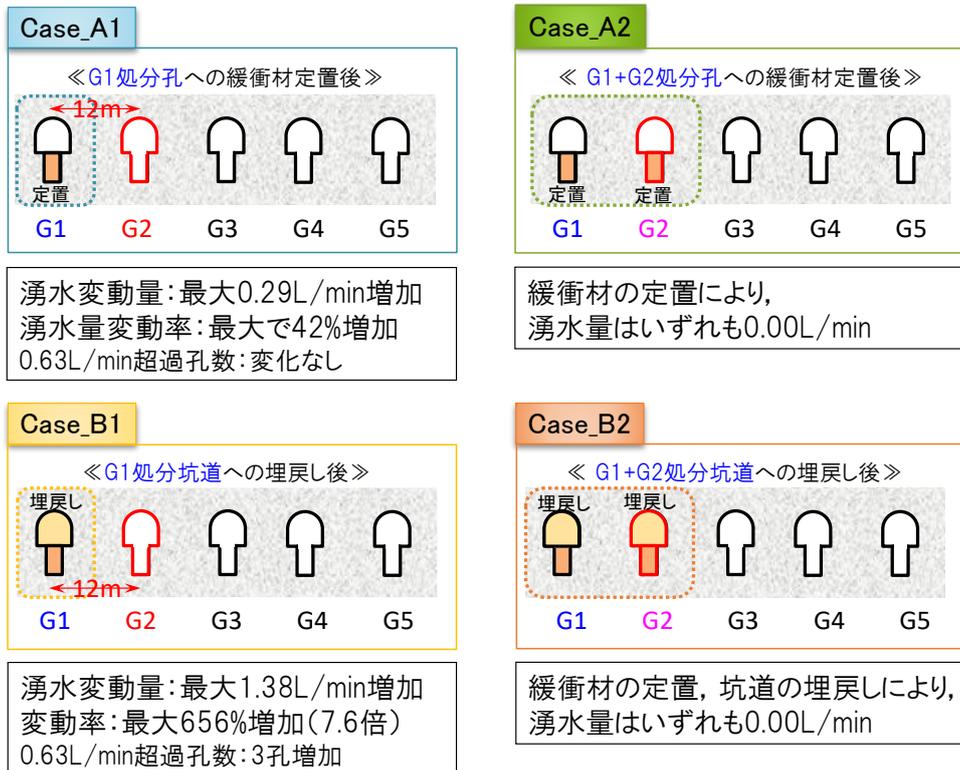


図 5.1.2-46 定置・埋戻しを行った場合の各ケースにおける G2 処分孔湧水量の変化のまとめ

c G4 処分坑道

G4 処分坑道について同様に処分孔の湧水変動について整理する。湧水量の算定結果を表 5.1.2-20、図 5.1.2-47、図 5.1.2-48 に、湧水変動量の結果を表 5.1.2-21、図 5.1.2-49、図 5.1.2-50 に、湧水変動倍率の結果を表 5.1.2-22、図 5.1.2-51、図 5.1.2-52 にそれぞれ示す。また、図 5.1.2-53 に処分孔湧水挙動の結果をまとめる。

処分孔掘削後の状態である Case_Initial では、処分孔湧水量は 0.00～2.92L/min であり、処分孔 1 孔あたりの平均では 0.24L/min と中心坑道 3 本の中で最も湧水量が大きい。

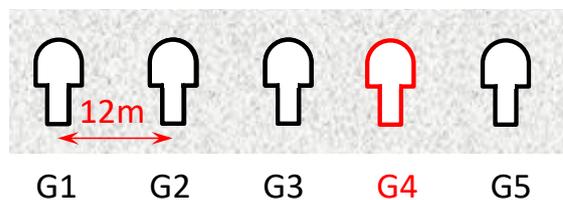
施工順序 A では、両ケースとも湧水量の変化はほとんどなく、湧水変動量は最大でも 0.01L/min 未満であった。

施工順序 B についても、CaseB1 では湧水変動量はいずれも 0.01L/min 未満であり、明瞭な変化は見られなかった。Case_B2 では、湧水量は 0.00～2.94L/min であり、湧水変動量では最大 0.02L/min、また変動倍率では最大で 1.34 倍（34%の増加）と湧水量の増加は確認されたが、その影響は小さかった。平均的な変動傾向としては、G3 処分坑道における Case_B1（2 本隣の処分坑道の埋戻しを行う条件）の結果と概ね同等であった。

G4 坑道における超過孔数を表 5.1.2-23 に示す。Case_Initial では超過孔数は合計で 10 孔と G2、G3 処分坑道に比べ大きい。ただし、いずれのケースでも新たに 0.63L/min を超過する処分孔は確認されず、超過孔数は合計で 10 孔のままであった。

表 5.1.2-20 定置・埋戻し後の処分孔湧水量算定結果 (G4 処分坑道)

G4	処分孔No.	処分孔湧水量 (L/min)					G4	処分孔No.	処分孔湧水量 (L/min)				
		Initial	A1	A2	B1	B2			Initial	A1	A2	B1	B2
HR01P	01	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	HR06P	01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	02	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16		02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
	03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03		03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02		04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	05	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01		05	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
	06	0.25	0.25	0.25	0.25	0.26		06	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	07	0.49	0.49	0.50	0.49	0.51		07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	08	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17		08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	09	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90		09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HR02P	01	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	HR07P	01	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	02	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11		02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02		03	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
	04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03		04	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
	05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02		05	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
	06	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11		06	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
	07	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15		07	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	08	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18		08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	09	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34		09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
HR03P	01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	HR08P	01	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59
	02	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18		02	0.49	0.49	0.49	0.49	0.50
	03	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08		03	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
	04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05		04	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53
	05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03		05	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59
	06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05		06	2.89	2.89	2.89	2.89	2.90
	07	0.26	0.26	0.26	0.26	0.27		07	2.92	2.92	2.92	2.92	2.94
	08	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06		08	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52
	09	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75		09	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.19	0.19	0.19	0.20	0.20
HR04P	01	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	HR09P	01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	02	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06		02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04		04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
	05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	06	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20		06	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	07	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02		07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	08	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04		08	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	09	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		09	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HR05P	01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	HR10P	01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		04	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11
	05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		05	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14
	06	0.86	0.86	0.86	0.86	0.87		06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
	07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		08	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		09	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04
	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
リアライゼーション 毎の平均							HR01P	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	
							HR02P	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	
							HR03P	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	
							HR04P	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	
							HR05P	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	
							HR06P	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
							HR07P	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	
							HR08P	1.23	1.23	1.23	1.23	1.24	
							HR09P	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	
							HR10P	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	
							処分孔1孔あたりの平均						
最大値							2.92	2.92	2.92	2.92	2.94		
最小値							0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		



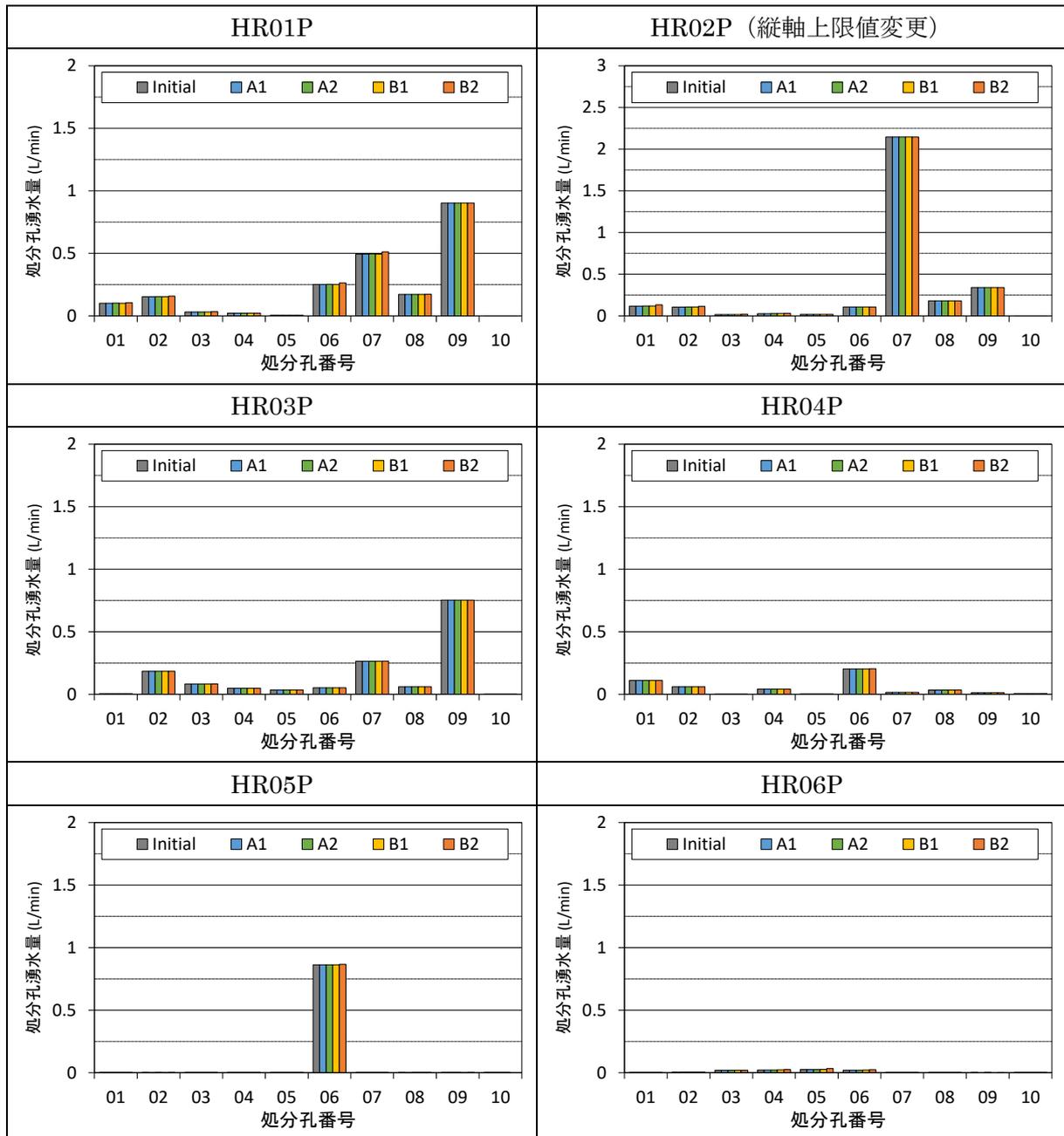


図 5.1.2-47 定置・埋戻し後の処分孔湧水量 (G4 処分坑道) (1)

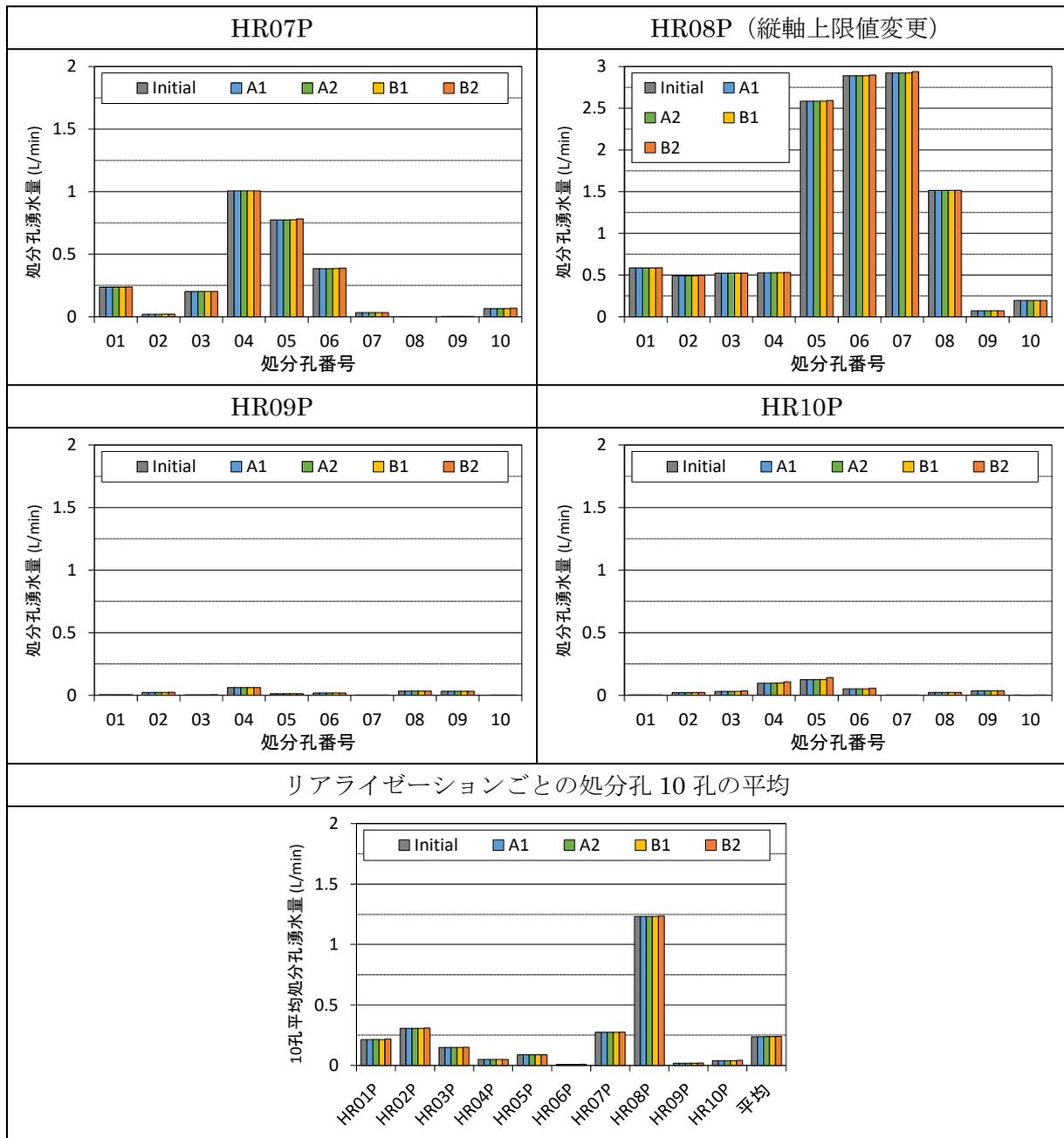
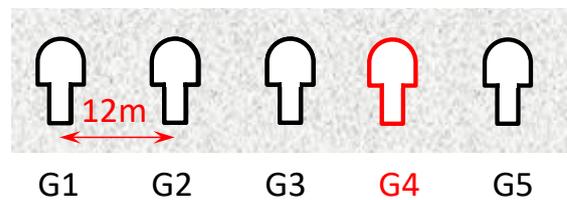


図 5.1.2-48 定置・埋戻し後の処分孔湧水量 (G4 処分坑道) (2)

表 5.1.2-21 定置・埋戻し後の処分孔湧水変動量算定結果 (G4 処分坑道)

G4	処分孔No.	処分孔湧水変動量 (L/min)				G4	処分孔No.	処分孔湧水変動量 (L/min)			
		A1	A2	B1	B2			A1	A2	B1	B2
HR01P	01	0.00	0.00	0.00	0.00	HR06P	01	0.00	0.00	0.00	0.00
	02	0.00	0.00	0.00	0.00		02	0.00	0.00	0.00	0.00
	03	0.00	0.00	0.00	0.00		03	0.00	0.00	0.00	0.00
	04	0.00	0.00	0.00	0.00		04	0.00	0.00	0.00	0.00
	05	0.00	0.00	0.00	0.00		05	0.00	0.00	0.00	0.01
	06	0.00	0.00	0.00	0.01		06	0.00	0.00	0.00	0.00
	07	0.00	0.00	0.00	0.02		07	0.00	0.00	0.00	0.00
	08	0.00	0.00	0.00	0.00		08	0.00	0.00	0.00	0.00
	09	0.00	0.00	0.00	0.00		09	0.00	0.00	0.00	0.00
	10	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.00	0.00	0.00	0.00
HR02P	01	0.00	0.00	0.00	0.01	HR07P	01	0.00	0.00	0.00	0.00
	02	0.00	0.00	0.00	0.01		02	0.00	0.00	0.00	0.00
	03	0.00	0.00	0.00	0.00		03	0.00	0.00	0.00	0.00
	04	0.00	0.00	0.00	0.00		04	0.00	0.00	0.00	0.00
	05	0.00	0.00	0.00	0.00		05	0.00	0.00	0.00	0.01
	06	0.00	0.00	0.00	0.00		06	0.00	0.00	0.00	0.00
	07	0.00	0.00	0.00	0.00		07	0.00	0.00	0.00	0.00
	08	0.00	0.00	0.00	0.00		08	0.00	0.00	0.00	0.00
	09	0.00	0.00	0.00	0.00		09	0.00	0.00	0.00	0.00
	10	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.00	0.00	0.00	0.00
HR03P	01	0.00	0.00	0.00	0.00	HR08P	01	0.00	0.00	0.00	0.00
	02	0.00	0.00	0.00	0.00		02	0.00	0.00	0.00	0.01
	03	0.00	0.00	0.00	0.00		03	0.00	0.00	0.00	0.00
	04	0.00	0.00	0.00	0.00		04	0.00	0.00	0.00	0.00
	05	0.00	0.00	0.00	0.00		05	0.00	0.00	0.00	0.01
	06	0.00	0.00	0.00	0.00		06	0.00	0.00	0.00	0.01
	07	0.00	0.00	0.00	0.00		07	0.00	0.00	0.00	0.02
	08	0.00	0.00	0.00	0.00		08	0.00	0.00	0.00	0.00
	09	0.00	0.00	0.00	0.00		09	0.00	0.00	0.00	0.00
	10	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.00	0.00	0.00	0.00
HR04P	01	0.00	0.00	0.00	0.00	HR09P	01	0.00	0.00	0.00	0.00
	02	0.00	0.00	0.00	0.00		02	0.00	0.00	0.00	0.00
	03	0.00	0.00	0.00	0.00		03	0.00	0.00	0.00	0.00
	04	0.00	0.00	0.00	0.00		04	0.00	0.00	0.00	0.00
	05	0.00	0.00	0.00	0.00		05	0.00	0.00	0.00	0.00
	06	0.00	0.00	0.00	0.00		06	0.00	0.00	0.00	0.00
	07	0.00	0.00	0.00	0.00		07	0.00	0.00	0.00	0.00
	08	0.00	0.00	0.00	0.00		08	0.00	0.00	0.00	0.00
	09	0.00	0.00	0.00	0.00		09	0.00	0.00	0.00	0.00
	10	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.00	0.00	0.00	0.00
HR05P	01	0.00	0.00	0.00	0.00	HR10P	01	0.00	0.00	0.00	0.00
	02	0.00	0.00	0.00	0.00		02	0.00	0.00	0.00	0.00
	03	0.00	0.00	0.00	0.00		03	0.00	0.00	0.00	0.00
	04	0.00	0.00	0.00	0.00		04	0.00	0.00	0.00	0.01
	05	0.00	0.00	0.00	0.00		05	0.00	0.00	0.00	0.02
	06	0.00	0.00	0.00	0.00		06	0.00	0.00	0.00	0.01
	07	0.00	0.00	0.00	0.00		07	0.00	0.00	0.00	0.00
	08	0.00	0.00	0.00	0.00		08	0.00	0.00	0.00	0.00
	09	0.00	0.00	0.00	0.00		09	0.00	0.00	0.00	0.00
	10	0.00	0.00	0.00	0.00		10	0.00	0.00	0.00	0.00
リアライゼーション 毎の平均	HR01P	0.00	0.00	0.00	0.00	HR01P	0.00	0.00	0.00	0.00	
	HR02P	0.00	0.00	0.00	0.00	HR02P	0.00	0.00	0.00	0.00	
	HR03P	0.00	0.00	0.00	0.00	HR03P	0.00	0.00	0.00	0.00	
	HR04P	0.00	0.00	0.00	0.00	HR04P	0.00	0.00	0.00	0.00	
	HR05P	0.00	0.00	0.00	0.00	HR05P	0.00	0.00	0.00	0.00	
	HR06P	0.00	0.00	0.00	0.00	HR06P	0.00	0.00	0.00	0.00	
	HR07P	0.00	0.00	0.00	0.00	HR07P	0.00	0.00	0.00	0.00	
	HR08P	0.00	0.00	0.00	0.00	HR08P	0.00	0.00	0.00	0.00	
	HR09P	0.00	0.00	0.00	0.00	HR09P	0.00	0.00	0.00	0.00	
	HR10P	0.00	0.00	0.00	0.00	HR10P	0.00	0.00	0.00	0.00	
処分孔1孔あたりの平均		0.00	0.00	0.00	0.00	処分孔1孔あたりの平均		0.00	0.00	0.00	0.00
最大値		0.00	0.00	0.00	0.02	最大値		0.00	0.00	0.00	0.02
最小値		0.00	0.00	0.00	0.00	最小値		0.00	0.00	0.00	0.00



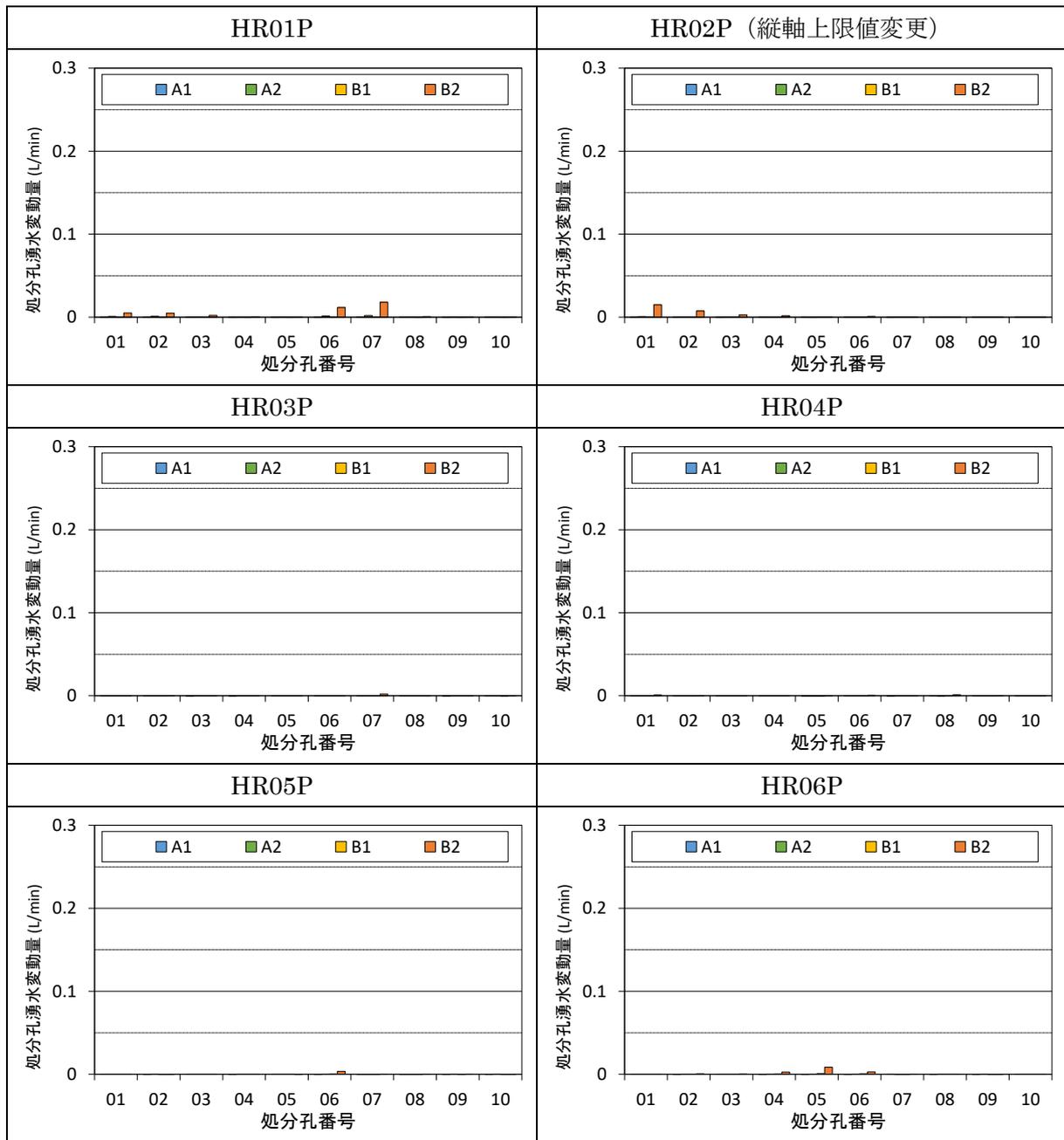


図 5.1.2-49 定置・埋戻し後の処分孔湧水変動量 (G4 処分坑道) (1)

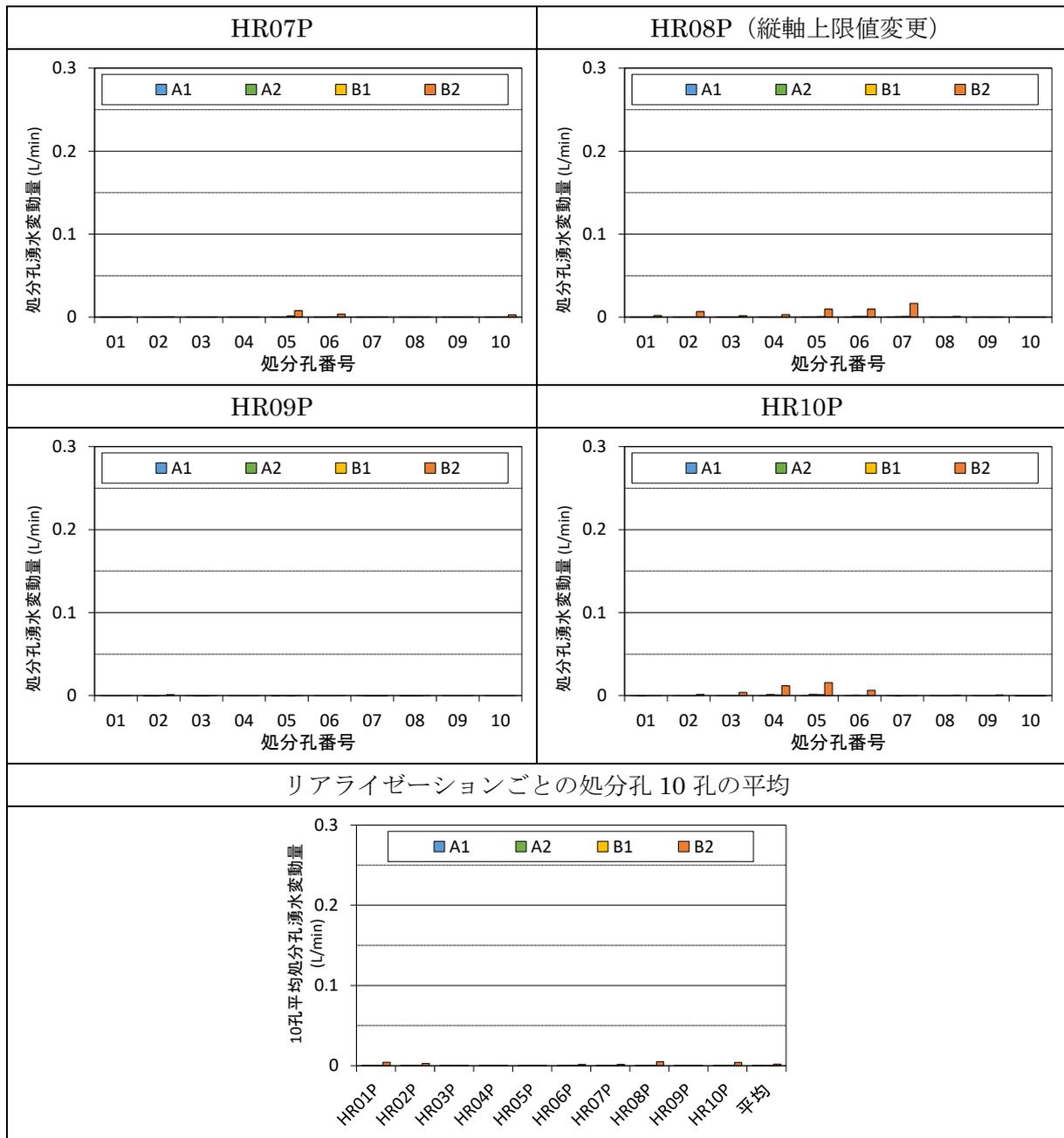
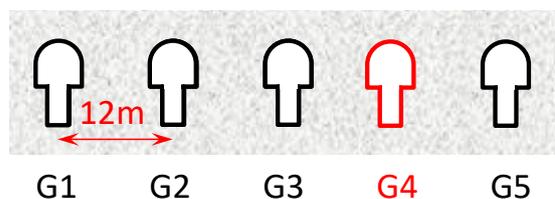


図 5.1.2-50 定置・埋戻し後の処分孔湧水変動量 (G4 処分坑道) (2)

表 5.1.2-22 定置・埋戻し後の処分孔湧水変動倍率算定結果 (G4 処分坑道)

G4	処分孔No.	処分孔湧水変動倍率(倍)				G4	処分孔No.	処分孔湧水変動倍率(倍)			
		A1	A2	B1	B2			A1	A2	B1	B2
HR01P	01	1.00	1.01	1.00	1.05	HR06P	01	-	-	-	-
	02	1.00	1.01	1.00	1.03		02	-	-	-	-
	03	1.00	1.01	1.00	1.07		03	1.00	1.00	1.00	1.02
	04	1.00	1.00	1.00	1.02		04	1.00	1.00	1.02	1.12
	05	-	-	-	-		05	1.00	1.00	1.03	1.34
	06	1.00	1.01	1.00	1.05		06	1.00	1.00	1.03	1.14
	07	1.00	1.00	1.00	1.04		07	-	-	-	-
	08	1.00	1.00	1.00	1.00		08	-	-	-	-
	09	1.00	1.00	1.00	1.00		09	-	-	-	-
	10	-	-	-	-		10	-	-	-	-
HR02P	01	1.00	1.01	1.00	1.13	HR07P	01	1.00	1.00	1.00	1.00
	02	1.00	1.00	1.00	1.07		02	1.00	1.00	1.00	1.03
	03	1.00	1.01	1.01	1.17		03	1.00	1.00	1.00	1.00
	04	1.00	1.00	1.00	1.06		04	1.00	1.00	1.00	1.00
	05	1.00	1.00	1.00	1.01		05	1.00	1.00	1.00	1.01
	06	1.00	1.00	1.00	1.01		06	1.00	1.00	1.00	1.01
	07	1.00	1.00	1.00	1.00		07	1.00	1.00	1.00	1.01
	08	1.00	1.00	1.00	1.00		08	-	-	-	-
	09	1.00	1.00	1.00	1.00		09	-	-	-	-
	10	-	-	-	-		10	1.00	1.00	1.01	1.04
HR03P	01	-	-	-	-	HR08P	01	1.00	1.00	1.00	1.00
	02	1.00	1.00	1.00	1.00		02	1.00	1.00	1.00	1.01
	03	1.00	1.00	1.00	1.00		03	1.00	1.00	1.00	1.00
	04	1.00	1.00	1.00	1.00		04	1.00	1.00	1.00	1.01
	05	1.00	1.00	1.00	1.00		05	1.00	1.00	1.00	1.00
	06	1.00	1.00	1.00	1.00		06	1.00	1.00	1.00	1.00
	07	1.00	1.00	1.00	1.01		07	1.00	1.00	1.00	1.01
	08	1.00	1.00	1.00	1.00		08	1.00	1.00	1.00	1.00
	09	1.00	1.00	1.00	1.00		09	1.00	1.00	1.00	1.00
	10	-	-	-	-		10	1.00	1.00	1.00	1.00
HR04P	01	1.00	1.00	1.00	1.01	HR09P	01	-	-	-	-
	02	1.00	1.00	1.00	1.01		02	1.00	1.00	1.00	1.05
	03	-	-	-	-		03	-	-	-	-
	04	1.00	1.00	1.00	1.00		04	1.00	1.00	1.00	1.00
	05	-	-	-	-		05	1.00	1.00	1.00	1.00
	06	1.00	1.00	1.00	1.00		06	1.00	1.00	1.01	1.02
	07	1.00	1.00	1.00	1.01		07	-	-	-	-
	08	1.00	1.00	1.00	1.03		08	1.00	1.00	1.00	1.00
	09	1.00	1.00	1.00	1.03		09	1.00	1.00	1.00	1.00
	10	-	-	-	-		10	-	-	-	-
HR05P	01	-	-	-	-	HR10P	01	-	-	-	-
	02	-	-	-	-		02	1.00	1.00	1.01	1.07
	03	-	-	-	-		03	1.00	1.01	1.01	1.12
	04	-	-	-	-		04	1.00	1.01	1.01	1.12
	05	-	-	-	-		05	1.00	1.01	1.01	1.12
	06	1.00	1.00	1.00	1.00		06	1.00	1.01	1.01	1.12
	07	-	-	-	-		07	-	-	-	-
	08	-	-	-	-		08	1.00	1.00	1.00	1.03
	09	-	-	-	-		09	1.00	1.00	1.00	1.02
	10	-	-	-	-		10	-	-	-	-
						リアライ ゼーション 毎の平均	HR01P	1.00	1.00	1.00	1.03
							HR02P	1.00	1.00	1.00	1.05
							HR03P	1.00	1.00	1.00	1.00
							HR04P	1.00	1.00	1.00	1.01
							HR05P	1.00	1.00	1.00	1.00
							HR06P	1.00	1.00	1.02	1.16
							HR07P	1.00	1.00	1.00	1.01
							HR08P	1.00	1.00	1.00	1.00
							HR09P	1.00	1.00	1.00	1.01
							HR10P	1.00	1.01	1.01	1.09
						処分孔1孔あたりの平均	1.00	1.00	1.00	1.04	
						最大値	1.00	1.01	1.03	1.34	
						最小値	1.00	1.00	1.00	1.00	



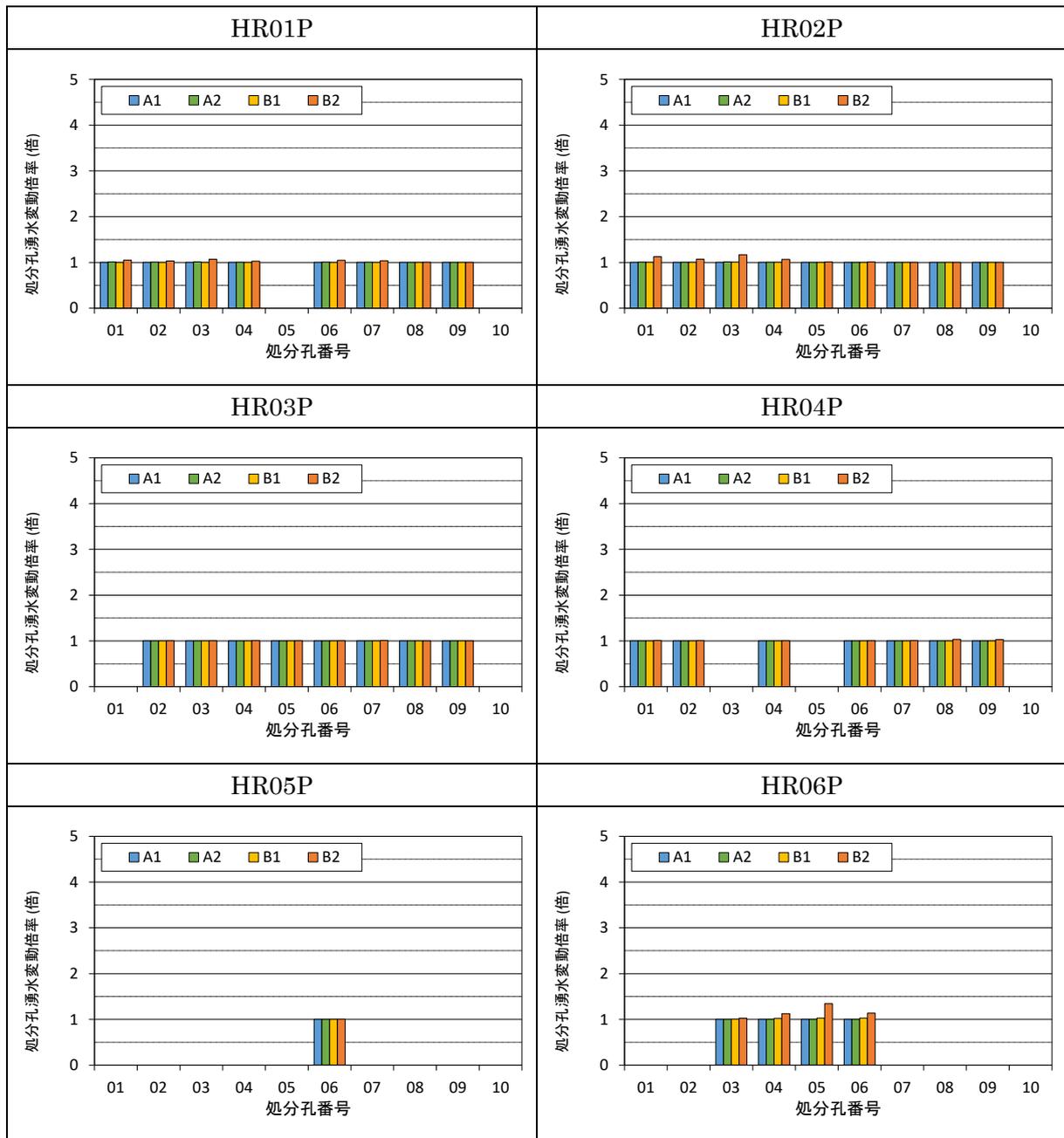


図 5.1.2-51 定置・埋戻し後の処分孔湧水変動倍率 (G4 処分坑道) (1)

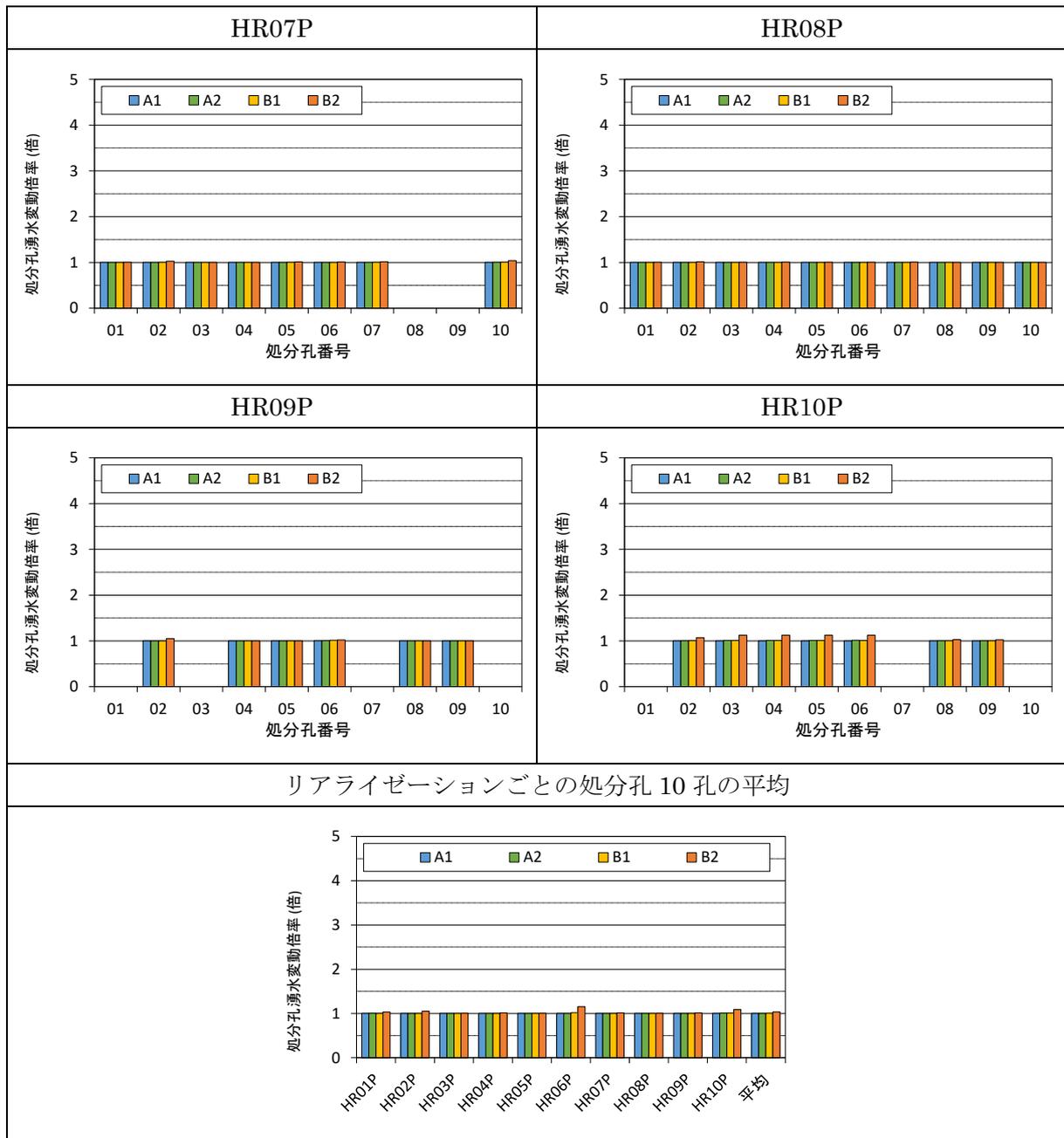


図 5.1.2-52 定置・埋戻し後の処分孔湧水変動倍率 (G4 処分坑道) (2)

表 5.1.2-23 G4 処分坑道における各解析ケースでの超過孔数

G4	処分孔湧水量0.63L/min以上の処分孔数				
	Initial	A1	A2	B1	B2
HR01P	1	1	1	1	1
HR02P	1	1	1	1	1
HR03P	1	1	1	1	1
HR04P	0	0	0	0	0
HR05P	1	1	1	1	1
HR06P	0	0	0	0	0
HR07P	2	2	2	2	2
HR08P	4	4	4	4	4
HR09P	0	0	0	0	0
HR10P	0	0	0	0	0
合計	10	10	10	10	10

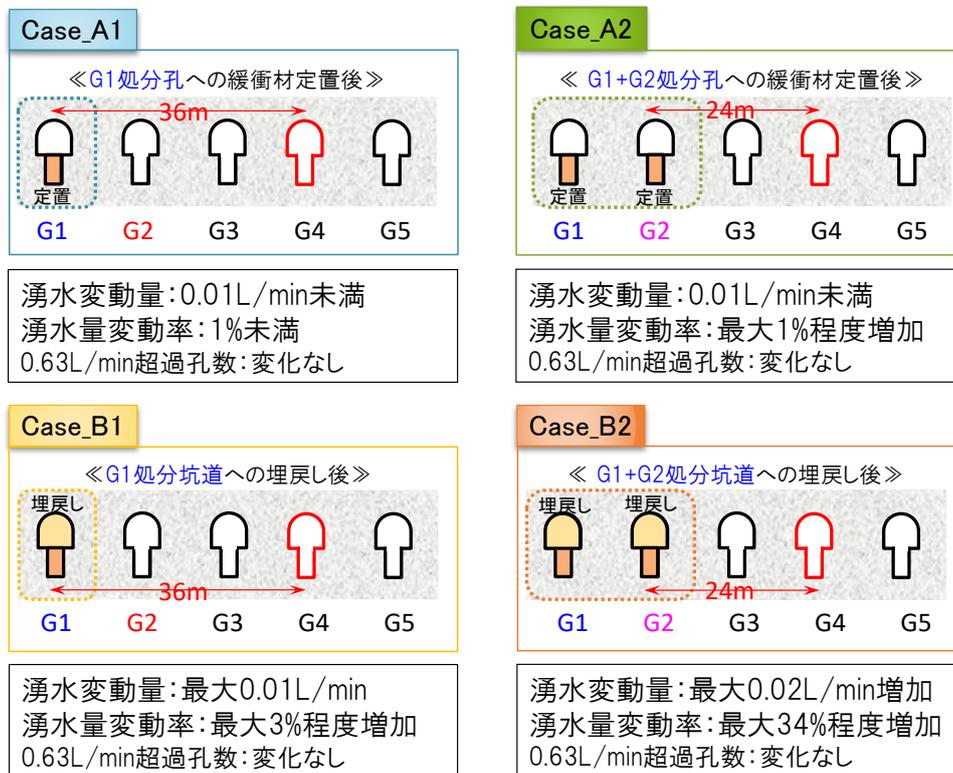


図 5.1.2-53 定置・埋戻しを行った場合の各ケースにおける G4 処分孔湧水量の変化のまとめ

6) 処分孔湧水量の変動に関する考察

5)は、各解析ケースにおける処分孔湧水量の算定結果を整理した。ここでは、湧水変動が大きかった処分孔を対象として、湧水挙動を評価する。図 5.1.2-54 に Case_B2 における G3 処分坑道の処分孔湧水変動量と変動倍率の関係を示す。湧水変動が大きい条件として、湧水変動量が 0.2L/min、変動倍率が 1.5 倍以上の処分孔としたところ、HR06P の処分孔 06、および HR08P の処分孔 08 が選定された。また、図 5.1.2-55 に Case_B1 における G2 処分坑道の処分孔湧水変動

量と変動倍率の関係を示す。同じ条件で処分孔を選定したところ、HR07P の処分孔 03、処分孔 08 処分孔 10、HR09P の処分孔 10 となった。

図 5.1.2-56 に HR06P の Case_Initial と Case_B2 における G3 処分坑道の処分孔流量分布図を示す。対象の処分孔 06 では、湧水量が 0.32L/min から 0.53L/min まで増加している。処分孔に交差する割れ目の流量の変化を確認すると、交差する 2 つの割れ目の変化量が処分孔湧水変動量の 98%を占めている。次に、図 5.1.2-57 に HR08P の G3 処分坑道の処分孔流量分布図を示す。対象の処分孔 08 では、湧水変動量の約 50%が処分孔へ交差する割れ目の湧水変動量によるものである。交差割れ目の中でも、1 つの割れ目の変動量がそのうちの 92%とほとんどの量を占めていることが確認された。図 5.1.2-58 と図 5.1.2-59 にそれぞれ HR07P と HR09P における G2 処分坑道の処分孔流量分布図を示す。これらも同様に、処分孔流量の変動量のほとんどすべてが処分孔に交差する 1 つ割れ目の湧水変動量に占められている。

以上のように、処分坑道の埋戻しにより隣接する処分坑道の処分孔湧水量が増加する。ただし、処分孔湧水量の変動は処分孔の領域で一様ではなく、交差する割れ目の分布により変わる。特に、処分孔に高透水の割れ目が交差している場合には、優先的にその高透水割れ目を通過することにより、局所的に湧水変動量が大きくなる事象が生じる可能性が示唆された。

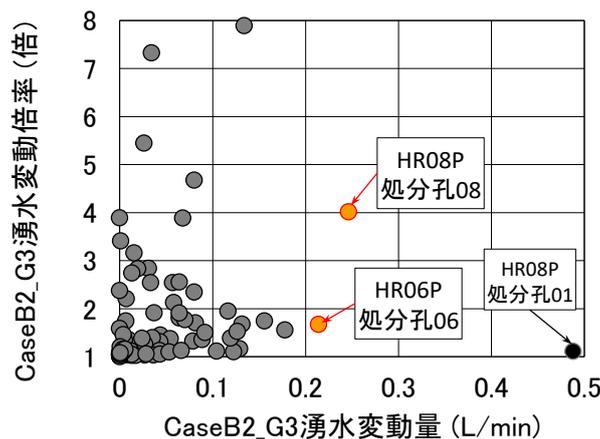


図 5.1.2-54 Case_B2 における G3 処分坑道の処分孔湧水変動量と変動倍率の関係

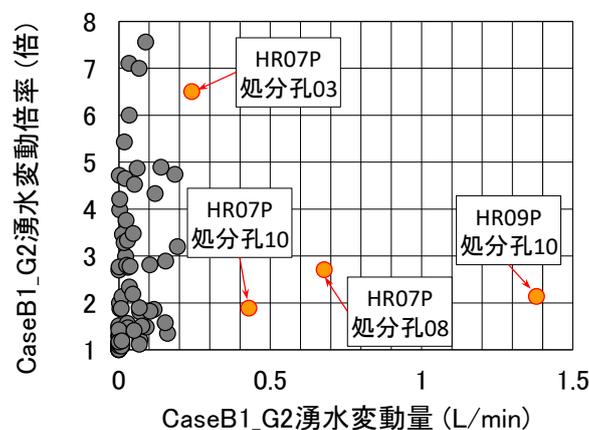


図 5.1.2-55 Case_B1 における G2 処分坑道の処分孔湧水変動量と変動倍率の関係

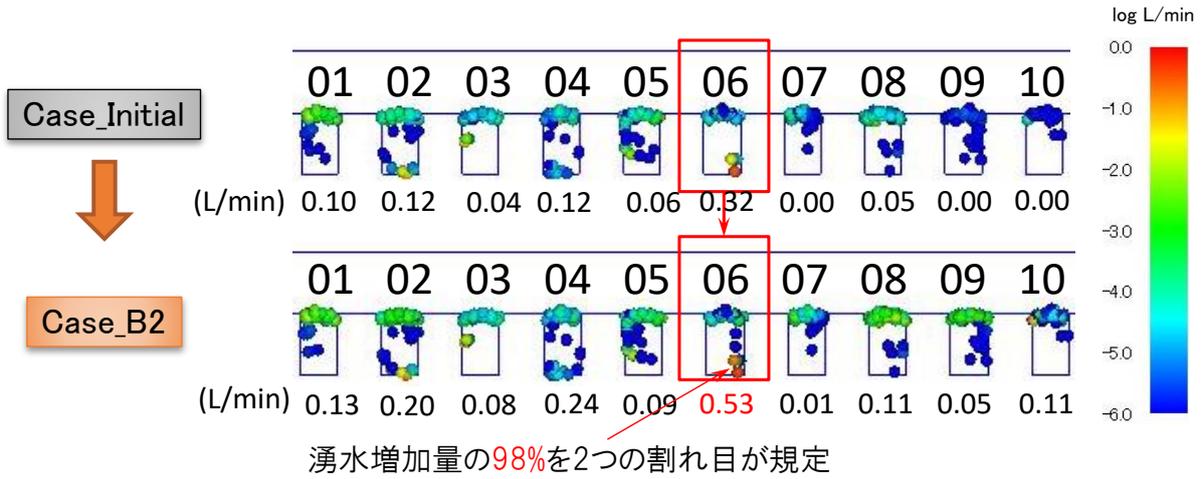


図 5.1.2-56 HR06P の Case_Initial と Case_B2 における G3 処分坑道の処分孔流量分布図

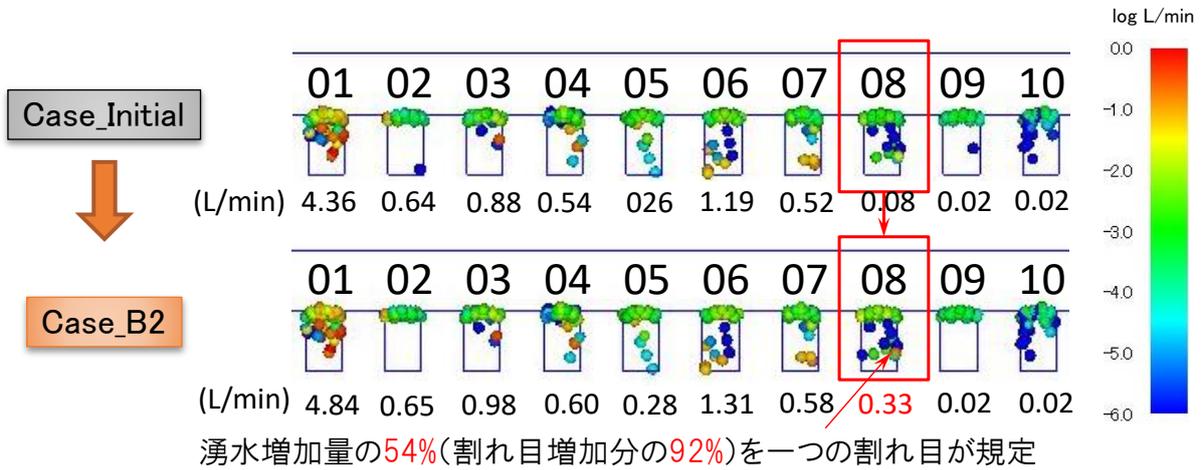


図 5.1.2-57 HR08P の Case_Initial と Case_B2 における G3 処分坑道の処分孔流量分布図

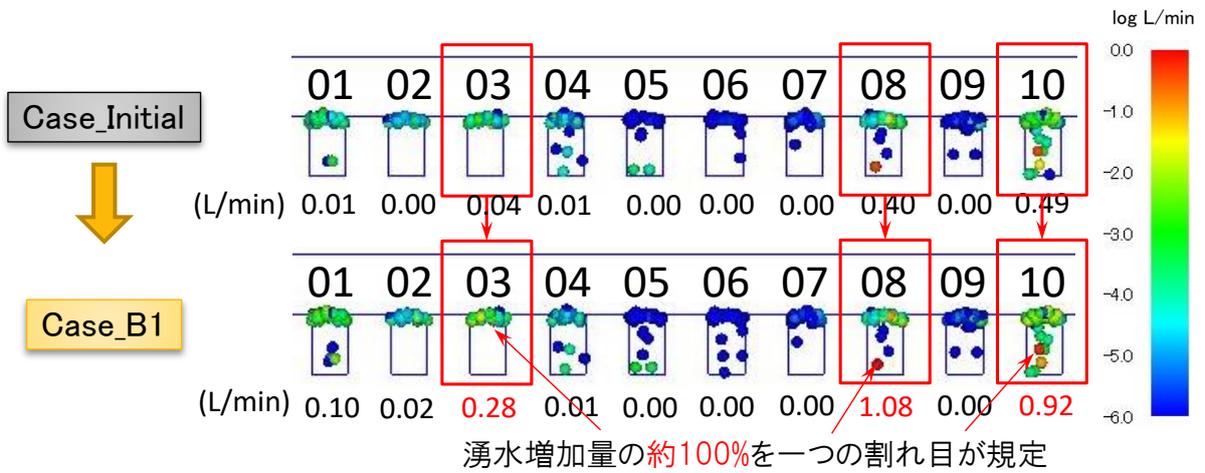


図 5.1.2-58 HR07P の Case_Initial と Case_B1 における G2 処分坑道の処分孔流量分布図

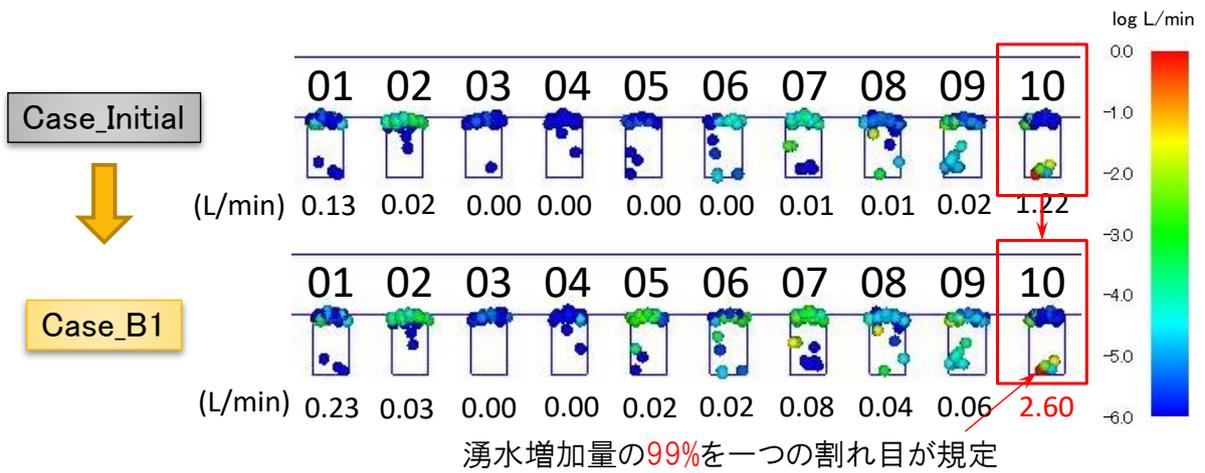


図 5.1.2-59 HR09P の Case_Initial と Case_B1 における G3 処分坑道の処分孔流量分布図

(4) まとめ

ここでは、平成 28 年度に作成した複数坑道モデルを用いて、処分孔への緩衝材の定置、処分坑道への埋戻しを保守的な条件によって模擬して浸透流解析を実施し、周辺の坑道および処分孔における湧水量への影響を評価した。以下に、定置・埋戻し実施箇所における境界条件の影響が最も小さいと考えられる G3 処分坑道の結果をまとめる。

● 処分坑道湧水量

処分坑道湧水量は緩衝材定置、処分坑道の埋戻しにより増加することが確認された。ただし、緩衝材の定置を先行する施工順序 A では、湧水増加量は隣接処分孔の定置を実施した場合 (Case_A1) でも最大で 0.02L/min、定置実施前からの変動倍率でも 1.05 倍程度であった。一方、定置後に埋戻しを行う施工順序 B では、湧水増加量は隣接処分坑道の埋戻しを実施した場合 (Case_B2) で最大 2.85L/min、定置・埋戻し実施前からの変動倍率で約 2.7 倍となった。

● 処分孔湧水量

処分孔湧水量についても、緩衝材定置、処分坑道の埋戻しにより増加することが確認された。ただし、施工順序 A では隣接処分孔の定置を実施した場合 (Case_A2) でも最大で 0.02L/min であり、定置を行うことにより、処分孔湧水量が新たに許容湧水量 (0.63L/min) を超える箇所は発生しなかった。一方、施工順序 B では、湧水増加量は隣接処分坑道の埋戻しを実施した場合 (Case_B2) で最大 0.49L/min 増加する処分孔が確認された。ただし、埋戻しにより新たに処分孔湧水量が許容湧水量を超える処分孔は見られなかった (参考として算定した G2 処分坑道の結果を合わせても、処分孔合計 200 孔中 3 孔のみ)。

以上より、保守的な条件で緩衝材の定置および処分坑道の埋戻しをモデル化した結果、周辺の処分坑道および処分孔の湧水が増加することが確認された。また、定置を先行する施工順序 A と、埋戻しを先行する施工順序 B の影響度合いを比較したところ、埋戻しを先行する施工順序 B の方が、処分孔の湧水量が大きくなることが示された。一方で、割れ目の湧水変動はリアライゼーション毎にばらつきがみられ、最大で 0.5L/min 程度増加する孔が見られるなど、割れ目の分布状態により変化することが確認された。ただし、新たに許容湧水量を超える処分孔の個数は確認されなかったことから、定置・埋戻しによる湧水量の増加は少なく、緩衝材の施工品質へ与える影響は小さいと考えられる。

5.1.3 定置後の処分孔周辺の地下水流動の評価

(1) 検討方針

NUMO[3]の資料によると、緩衝材定置後の再冠水期間においては、処分孔への地下水の流入により水みち形成(パイピング)及びエロージョンにより緩衝材の流出、密度の低下が生じる可能性があり、人工バリアの長期性能に影響を与えるリスクの検討が必要とされている。そこで、処分孔に緩衝材が定置された後の状態を模擬し、緩衝材の湧水量(通過流量)に関する評価を行った。

(2) 平成 28 年度解析結果の整理

1) 解析モデル

検討には、平成 28 年度の 5 本坑道モデルのうち処分孔掘削後の湧水量が最大となった HR08P モデルを使用した。HR08P モデルにおいて、処分孔に交差する 0.01L/min の流量を持つ割れ目の分布を図 5.1.3-1 に示す。また、処分坑道、処分孔の湧水量を表 5.1.3-1 と図 5.1.3-2 に示す。

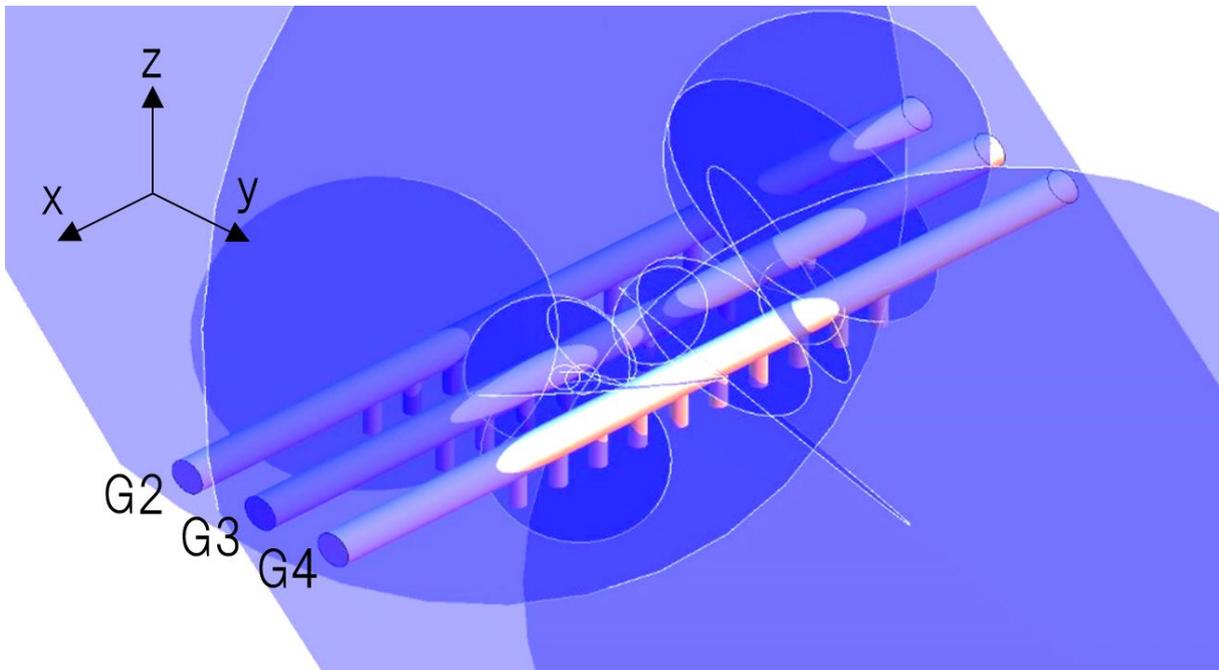


図 5.1.3-1 0.01L/min 以上処分孔交差割れ目分布 (HR08P)

表 5.1.3-1 モデル中央の処分坑道および処分孔湧水量 (HR08P)

HR08P		湧水量(L/min)
処分坑道	G3	21.20
処分孔	01	4.36
	02	0.64
	03	0.88
	04	0.54
	05	0.26
	06	1.19
	07	0.52
	08	0.08
	09	0.02
	10	0.02
処分孔算術平均		0.85

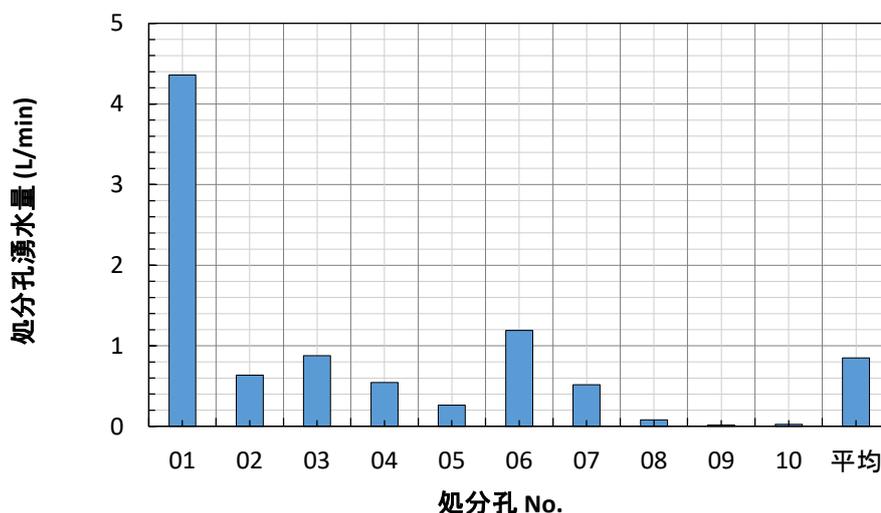


図 5.1.3-2 処分孔湧水量 (HR08P)

2) 平成 28 年度緩衝材定置のモデル化手法

平成 28 年度には、簡易的に緩衝材の定置をモデル化し処分孔の湧水量に関して試解析を行った。緩衝材の定置のモデル化は、平成 28 年度に作成した水理地質構造モデルにおいて、緩衝材領域（処分孔内部）に位置するパイプの透水係数をすべて一定の割合に低下させることにより表現した。まず、緩衝材を定置する処分孔単位で所定の透水性を表現するため、処分孔ごとの湧水量と処分孔周りの透水性の関係を評価した。ここで、処分孔周りの透水性は、処分孔と交差するパイプ（パイプ数 N ）の透水係数と断面積の積の和として、以下の式で算定した。

$$Q_p = \sum_{i=1}^N k_i A_i$$

ここで、 Q_p はパイプ沿いの動水勾配を 1 とした時の流量を、 k_i は該当する N 本のパイプのうち i 番目のパイプの透水係数を、 A_i は同パイプの断面積をそれぞれ示す。

そして、上で求めた処分孔に交差するパイプの流量をもとに、緩衝材定置領域の透水性が所定の透水係数相当となるよう、処分孔ごとにパイプの透水係数の低減率を設定した。低減率は以下の式で定義した。

$$\alpha_{buf} = \frac{S_p k_{buf}}{Q_p}$$

ここで、 S_p は処分孔の表面積 ($S_p=17.25\pi \text{ m}^2$)、 k_{buf} は緩衝材の透水係数の設定値を表す。なお、緩衝材と岩盤をまたぐパイプの透水性は変化させず、緩衝材領域に包含されるパイプの透水性を低減させることとした。緩衝材定置のモデル化の概念図を図 5.1.3-3 に示す。本検討では、緩衝材の透水係数を、 $1.0 \times 10^{-12} \text{ m/sec}$ 、 $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/sec}$ 、 $6.0 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$ 、 $1.0 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ 、 $1.0 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ 、 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$ の計 6 つのケースに設定し、それぞれ湧水量を算定した。各ケースにおける緩衝材の透水係数の設定値に対するパイプの透水係数の低減係数を表 5.1.3-2 に示す。



図 5.1.3-3 緩衝材定置のモデル化の概念図

表 5.1.3-2 緩衝材の透水係数の設定値に対する低減係数

HR08P	断面積 × 透水係数の和	低減係数 α					
		$k=1.0E-12$	$k=1.0E-10$	$k=6.0E-09$	$k=1.0E-07$	$k=1.0E-05$	$k=1.0E-03$
処分孔01	9.6E-05	5.7E-07	5.7E-05	3.4E-03	5.7E-02	5.7E+00	5.7E+02
処分孔02	8.3E-05	6.6E-07	6.6E-05	3.9E-03	6.6E-02	6.6E+00	6.6E+02
処分孔03	8.6E-05	6.3E-07	6.3E-05	3.8E-03	6.3E-02	6.3E+00	6.3E+02
処分孔04	1.0E-04	5.4E-07	5.4E-05	3.2E-03	5.4E-02	5.4E+00	5.4E+02
処分孔05	6.4E-05	8.5E-07	8.5E-05	5.1E-03	8.5E-02	8.5E+00	8.5E+02
処分孔06	7.8E-05	6.9E-07	6.9E-05	4.2E-03	6.9E-02	6.9E+00	6.9E+02
処分孔07	6.9E-05	7.8E-07	7.8E-05	4.7E-03	7.8E-02	7.8E+00	7.8E+02
処分孔08	6.8E-05	8.0E-07	8.0E-05	4.8E-03	8.0E-02	8.0E+00	8.0E+02
処分孔09	4.8E-05	1.1E-06	1.1E-04	6.7E-03	1.1E-01	1.1E+01	1.1E+03
処分孔10	4.1E-05	1.3E-06	1.3E-04	8.0E-03	1.3E-01	1.3E+01	1.3E+03
算術平均	7.3E-05	8.0E-07	8.0E-05	4.8E-03	8.0E-02	8.0E+00	8.0E+02

3) 処分坑道湧水量および緩衝材通過流量の算定結果

各ケースにおける緩衝材の透水係数の設定値に対して得られた処分坑道湧水量と緩衝材通過流量を表 5.1.3-3 に示す。まず、透水係数に応じた処分坑道湧水量の変化を図 5.1.3-4 に示す。緩衝材の透水係数の設定値が、 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/sec} \sim 6.0 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$ の間では、透水係数の低下に伴い処分坑道湧水量が小さくなっている。一方で、岩盤相当の透水係数である $6.0 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$ より小さい条件では、湧水量はほとんど変化せず透水係数の変化の影響が小さくなる結果となった。

次に、透水係数に応じた処分孔通過流量の変化を両対数グラフで図 5.1.3-5 に示す。概ね透水係数が小さくなるにつれて緩衝材通過流量は小さくなる傾向が確認できる。10 孔の平均値を見ると、その変化傾向は $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/sec} \sim 1.0 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$ にかけては減少量が小さく、 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/sec} \sim 6.0 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$ では減少量が大きくなり、 $6.0 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$ からは再び減少量が小さくなる傾向を示す。ただし、処分孔ごと変化傾向にはばらつきが見られ、 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/sec} \sim 1.0 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ にかけて比較的大きく通過流量が減少する孔（処分孔 01、処分孔 07、処分孔 09、処分孔 10）、透水係数が $6.0 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$ より小さい条件において処分孔通過流量が減少する孔（処分孔 02、処分孔 06、処分孔 08、処分孔 09）が確認された。

表 5.1.3-3 緩衝材の透水係数の設定値と処分孔通過流量の関係

HR08P		通過流量(L/min)					
透水係数 (m/sec)		1.0E-12	1.0E-10	6.0E-09	1.0E-07	1.0E-05	1.0E-03
処分坑道	G3	29.91	29.91	29.97	30.29	30.97	31.19
処分孔	01	0.57	0.57	0.58	0.63	2.20	4.20
	02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.21	0.16
	03	0.04	0.04	0.04	0.07	0.32	0.51
	04	0.06	0.06	0.06	0.09	0.47	0.63
	05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.10	0.27
	06	0.00	0.00	0.00	0.07	0.68	0.81
	07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.17	0.24
	08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05
	09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
	10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
処分孔算術平均		0.07	0.07	0.08	0.10	0.42	0.69

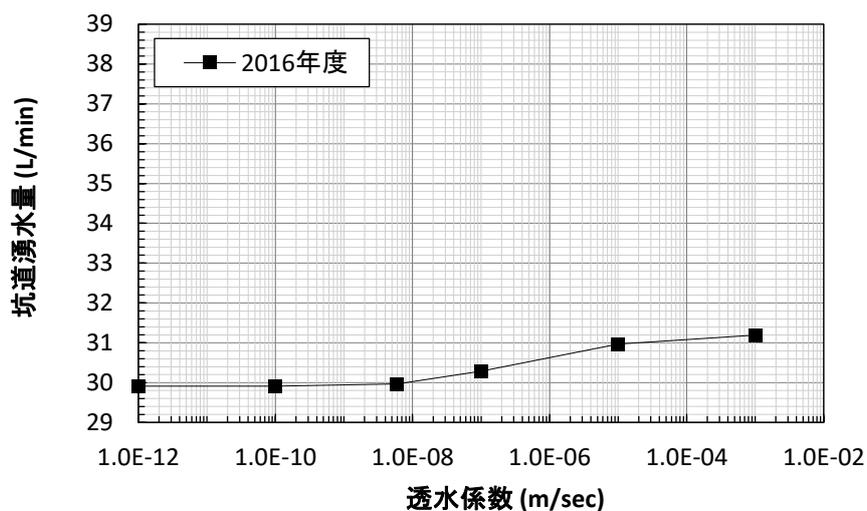


図 5.1.3-4 緩衝材の透水係数を変化させたときの処分坑道湧水量の変化

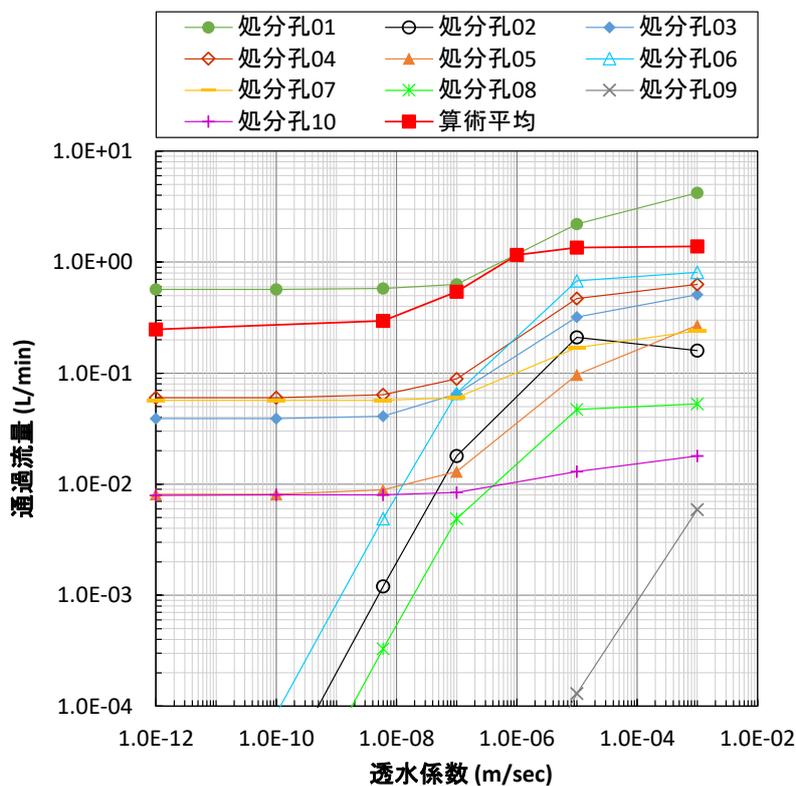


図 5.1.3-5 緩衝材の透水係数を変化させたときの処分孔通過流量の変化

4) 緩衝材の地下水圧（全水頭）分布

図 5.1.3-6 に処分孔 08 の埋戻し後の緩衝材領域における地下水圧（全水頭）の分布を示す。緩衝材の透水係数の設定値が異なる各図において、図の上端は、緩衝材領域の上端を示す。全体として緩衝材の透水係数を小さく設定するほど、内部の全水頭の値が大きくなる傾向が読み取れる。ただし、一部の節点では大気圧境界面に連通している影響で緩衝材の透水係数の設定値に対する感度の悪い箇所があった。

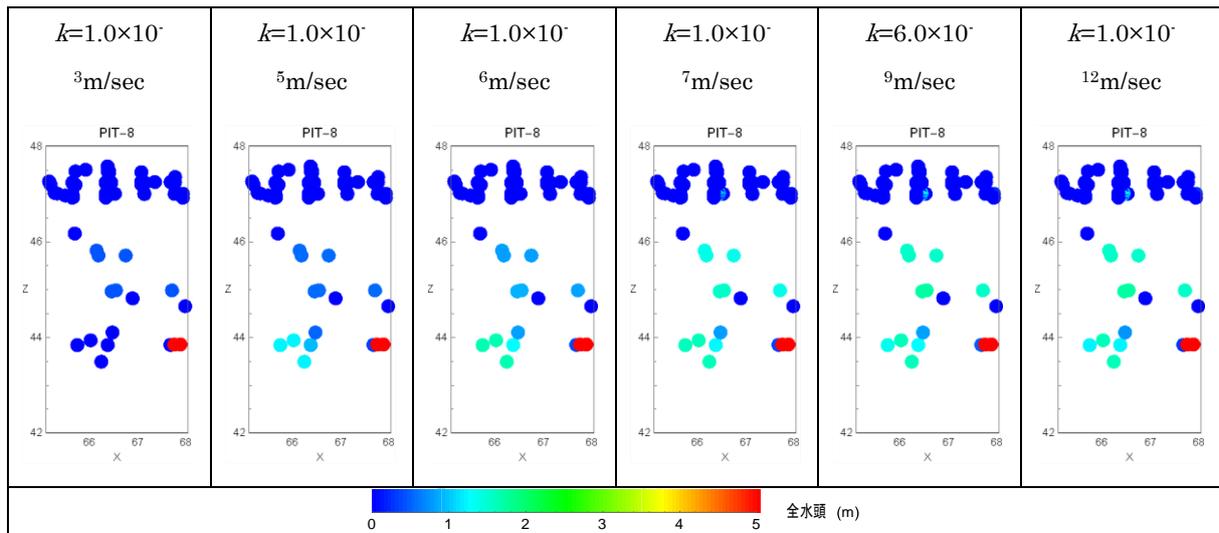


図 5.1.3-6 緩衝材の透水係数を変化させたときの処分孔領域（処分孔 08）の全水頭分布

5) 平成 28 年度モデル化手法の特徴

平成 28 年度の検討は、緩衝材位置の試解析という位置づけで、同年度に構築した水理地質構造モデルをそのまま用いて簡易的に緩衝材の位置を表現した。以下にモデル化の特徴を整理する。

- ① 緩衝材の水みちとなる割れ目は、水理地質構造をモデル化する際に統計量に基づき確率論的に発生させたものであるため、処分孔によっては交差するパイプの数が少なく、分布に偏りが発生する場合がある。
- ② 緩衝材の透水係数の設定値に応じて、モデル中のパイプの透水係数の低減率を計算する際、処分孔表面に接するパイプを用いた。しかし正確に緩衝材のモデル化を行うには緩衝材領域に内包するパイプについて透水係数を低減する必要があるため、完全には一致してない。
- ③ 処分孔周りに EDZ に相当するパイプを配置していない。

上記の特徴のうち、①と②については緩衝材の透水性に関わる項目であり、パイプの条件によっては設定した緩衝材の透水係数と実際の緩衝材の透水係数に乖離が発生する可能性がある。③については、処分孔周辺の地下水流動場に関わる項目であり、比較的透水性の高い EDZ を通過する湧水の影響を考慮することが出来ない問題がある。以上より、現実になるべく近い処分孔周辺の流動場を再現するためには、緩衝材を通過する流れと EDZ を通過する流れを模擬するモデルの作成が必要である。

(3) 本年度の緩衝材位置のモデル化手法

1) 処分孔および処分孔周りの EDZ のモデル化

本年度は、(2)を踏まえて処分孔（緩衝材）と EDZ の流れ場を模擬するためのモデル化を行った。具体的には、図 5.1.3-7 に示すように処分孔（緩衝材）と EDZ の境界、および EDZ と健岩部の境界にパイプが格子状に配備されるように割れ目を作成し、緩衝材、EDZ に交差した割れ目を流れる湧水が処分坑道まで流出するようにモデル化を行った。この際、処分孔および EDZ の断面は図 5.1.3-8 のように、円形の処分孔および EDZ それぞれの面積と等価な正方形となるよう一

辺の長さを設定した。なお、処分孔内に位置するパイプは除去している。これにより、緩衝材通過流量は処分孔／岩盤境界のパイプを通過する湧水量で再現でき、EDZ 通過流量は EDZ／健全岩部境界のパイプを通過する湧水量で再現できる。また、透水係数の設定は、各境界のパイプに対して設定した。

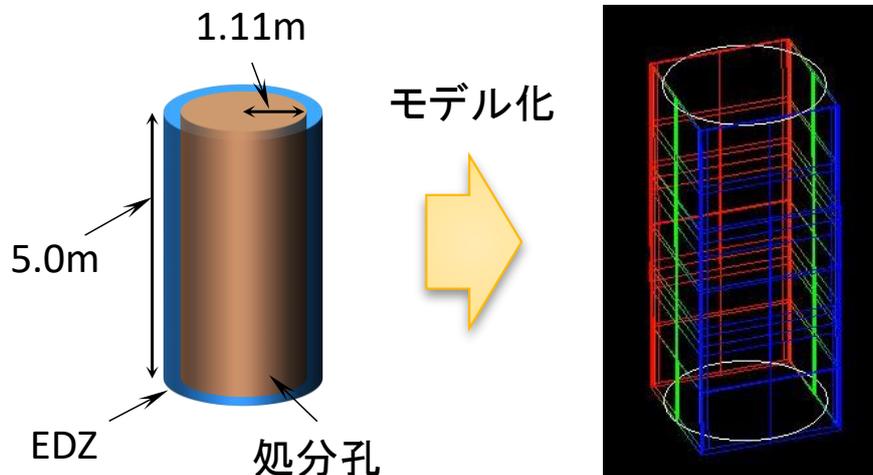


図 5.1.3-7 処分孔と EDZ のモデル化の概念図 (パイプの配置)

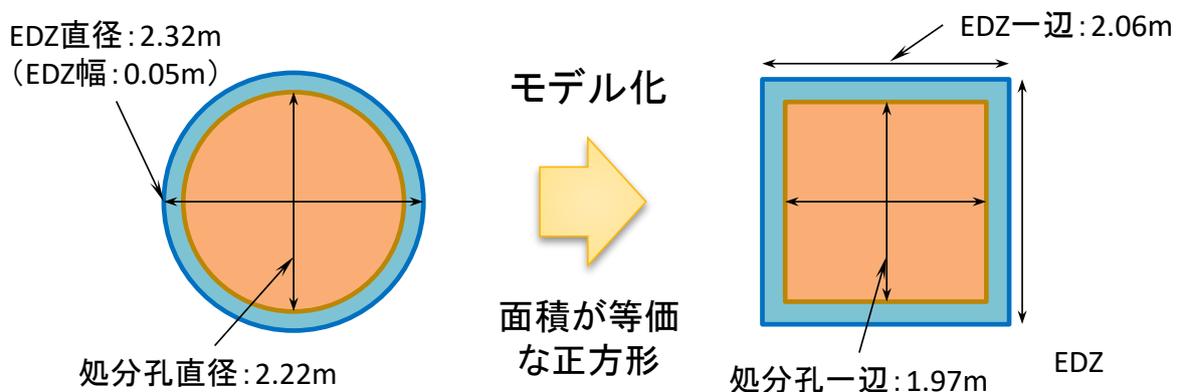


図 5.1.3-8 処分孔と EDZ のモデル化の概念図 (断面形状)

2) 緩衝材および EDZ 通過流量の算定条件

本検討では、平成 28 年度と同様に最も湧水量が多かった HR08P モデルを使用し、緩衝材通過流量と EDZ 通過流量を算定した。緩衝材および EDZ のモデル化のために作成したパイプの上端節点（処分坑道と接する節点）を大気圧境界とし、その節点における湧水量の合計値をそれぞれの通過流量とした。図 5.1.3-9 にモデル上での通過流量の算定箇所概念図を示す。

解析のケースは、EDZ を考慮しない場合と EDZ を考慮する場合の 2 パターンについて検討した。EDZ を考慮しない場合とは、EDZ 部のパイプの透水係数を岩盤相当 (6.0×10^{-9} m/sec) に設定した条件である。一方、EDZ を考慮する場合とは、EDZ 部の透水係数を EDZ 相当 (1.0×10^{-6} m/sec) に設定した条件である。また、それぞれのパターンについて緩衝材（処分孔／岩盤境界の

パイプ) の透水係数を、 1.0×10^{-12} m/sec、 6.0×10^{-9} m/sec、 1.0×10^{-7} m/sec、 1.0×10^{-6} m/sec、 1.0×10^{-5} m/sec、 1.0×10^{-3} m/sec の 6 ケース設定し、計 12 ケースの解析を行った。解析ケースを表 5.1.3-4 に示す。

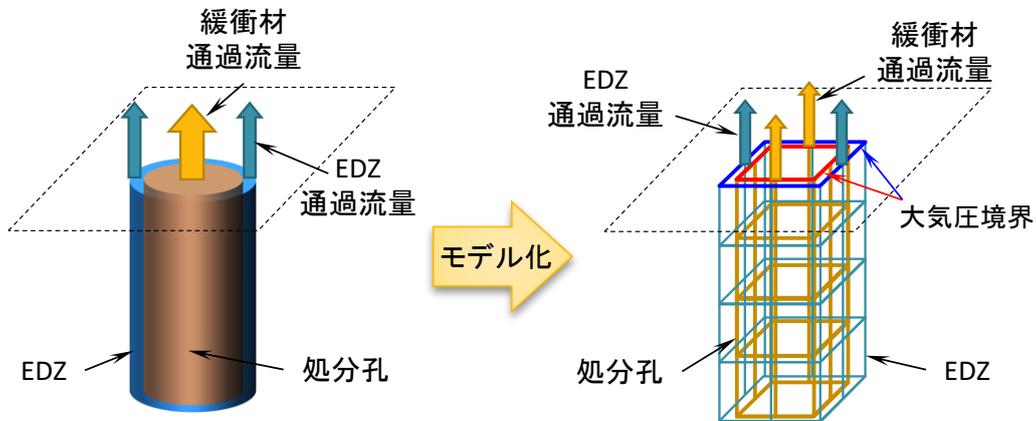


図 5.1.3-9 モデル上での通過流量算定箇所の概念図

表 5.1.3-4 解析ケース

#	EDZの有無	EDZ部透水係数 (m/sec)	緩衝材透水係数 (m/sec)
1	EDZなし	6.0×10^{-9} (岩盤相当の 透水係数を付与)	1.0×10^{-12}
2			6.0×10^{-9}
3			1.0×10^{-7}
4			1.0×10^{-6}
5			1.0×10^{-5}
6			1.0×10^{-3}
7	EDZあり	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-12}
8			6.0×10^{-9}
9			1.0×10^{-7}
10			1.0×10^{-6}
11			1.0×10^{-5}
12			1.0×10^{-3}

(4) 緩衝材定置後の地下水流動解析結果

1) EDZ を考慮しない条件

EDZ を考慮しない条件において、緩衝材の透水係数を変化させた際の緩衝材通過流量および EDZ 部 (処分孔直近) 通過流量、また緩衝材の地下水圧 (全水頭) を算定した。EDZ を考慮しない状況は、5) で述べた通り、EDZ/健岩部境界のパイプに対して岩盤相当の透水係数 (6.0×10^{-9} m/sec) を設定することでモデル化している。

a 処分孔周辺の通過流量

● 緩衝材通過流量

緩衝材通過流量について確認する。(3) で述べた通り、緩衝材の通過流量は緩衝材/EDZ の境界

に配置したパイプを通過し、モデル上端部の大気圧境界を設定した節点において流出する湧水量の合計値を示す。緩衝材および処分孔直近の通過流量の算定結果を表 5.1.3-5 に、透水係数と緩衝材通過流量の関係を両対数で表したグラフを図 5.1.3-10 に示す。いずれのリアライゼーションでも透水係数が小さくなるにつれて全体的に流量は減少する傾向が確認できた。処分孔 01 では、透水係数が 1.0×10^{-3} m/sec の時の湧水量が 8.11L/min であったが、透水係数が 1.0×10^{-12} m/sec の条件では 0.98 L/min (約 12%) まで減少した。ただし、その変化傾向は単調ではなく概ね 1.0×10^{-3} m/sec ~ 1.0×10^{-6} m/sec にかけては減少量が小さく、 1.0×10^{-6} m/sec ~ 6.0×10^{-9} m/sec では減少量が大きくなり、 6.0×10^{-9} m/sec からは再び減少量が小さくなる傾向を示す。この傾向は、昨年度算定した緩衝材通過流量の 10 孔の平均値の変化傾向と類似している。処分孔 07、処分孔 09、処分孔 10 については、透水係数が 6.0×10^{-9} m/sec より小さい場合でも流量が減少を続ける傾向を示した。処分孔は異なるが、この傾向は昨年度モデルにおける算定結果においても一部の処分孔で確認されている。また、処分孔 02、処分孔 05、処分孔 06 については、透水係数が 1.0×10^{-7} m/sec から 6.0×10^{-9} m/sec にかけて通過流量が増加するという結果が見られた。

● 処分孔直近の通過流量

処分孔直近の通過流量について確認する。処分孔直近の通過流量は、EDZ/健岩部の境界に配置したパイプ（岩盤相当の透水係数を設定）を通過し、モデル上端部の大気圧境界を設定した節点において流出する湧水量の合計値を示す。処分孔直近の通過流量の算定結果を表 5.1.3-6 に、透水係数と処分孔直近の通過流量の関係を両対数で表したグラフを図 5.1.3-11 に示す。処分孔直近の通過流量は、緩衝材の透水係数の範囲が 1.0×10^{-3} m/sec ~ 1.0×10^{-7} m/sec の間では、緩衝材の透水係数の低下に伴い、べき関数的に通過流量が増加していく。緩衝材の透水係数が 1.0×10^{-7} m/sec 以下になるとその傾きが大きく変化し、変動量が小さくなる傾向が認められた。ただし、処分孔 08 については、透水係数の変化に対する応答が小さい結果となった。

表 5.1.3-5 EDZ を考慮しない場合の各処分孔における緩衝材通過流量算定結果

EDZなし 透水係数 (m/sec)	緩衝材通過流量(L/min)					
	1.0E-12	6.0E-09	1.0E-07	1.0E-06	1.0E-05	1.0E-03
処分孔01	0.98	1.28	3.36	6.95	7.96	8.11
処分孔02	0.95	0.96	0.54	1.73	2.22	2.29
処分孔03	0.03	0.09	0.64	1.28	1.45	1.47
処分孔04	0.15	0.18	0.24	0.42	0.46	0.46
処分孔05	0.09	0.11	0.10	0.21	0.25	0.26
処分孔06	0.26	0.28	0.27	0.59	0.73	0.76
処分孔07	0.00	0.04	0.18	0.25	0.25	0.25
処分孔08	0.01	0.01	0.07	0.19	0.22	0.23
処分孔09	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
処分孔10	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
算術平均	0.25	0.30	0.54	1.16	1.35	1.38

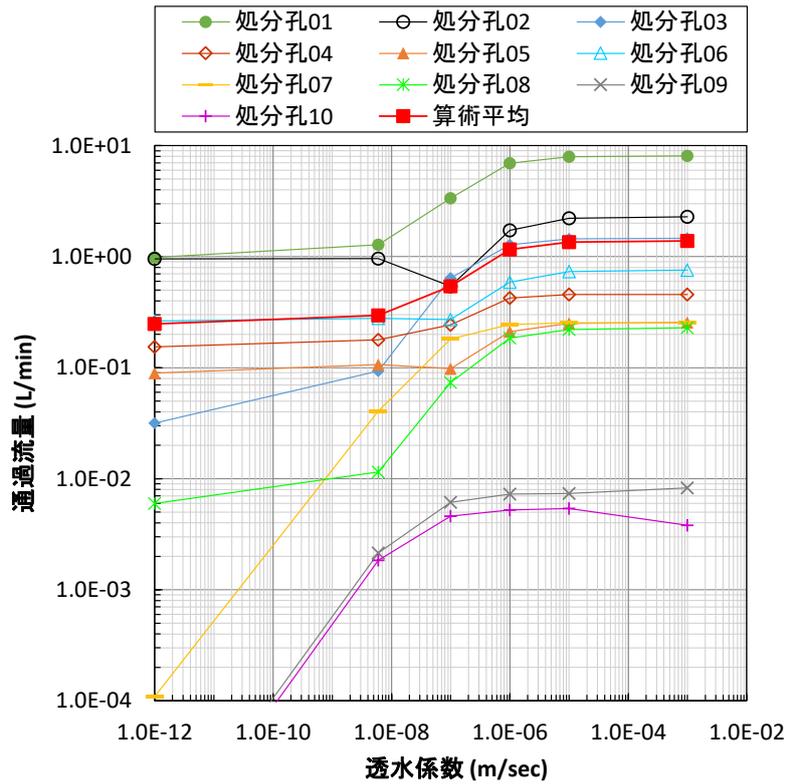


図 5.1.3-10 EDZ を考慮しない場合の各処分孔における透水係数と緩衝材通過流量の関係

表 5.1.3-6 EDZ を考慮しない場合の各処分孔における処分孔直近の通過流量算定結果

EDZなし 透水係数 (m/sec)	処分孔直近通過流量(L/min)					
	1.0E-12	6.0E-09	1.0E-07	1.0E-06	1.0E-05	1.0E-03
処分孔01	0.33	0.33	0.38	0.10	0.01	0.00
処分孔02	0.95	0.94	1.17	0.36	0.05	0.00
処分孔03	0.06	0.06	0.08	0.02	0.00	0.00
処分孔04	0.18	0.17	0.11	0.02	0.00	0.00
処分孔05	0.10	0.10	0.11	0.03	0.00	0.00
処分孔06	0.16	0.16	0.23	0.10	0.01	0.00
処分孔07	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
処分孔08	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
処分孔09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
処分孔10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
算術平均	0.18	0.18	0.21	0.06	0.01	0.00

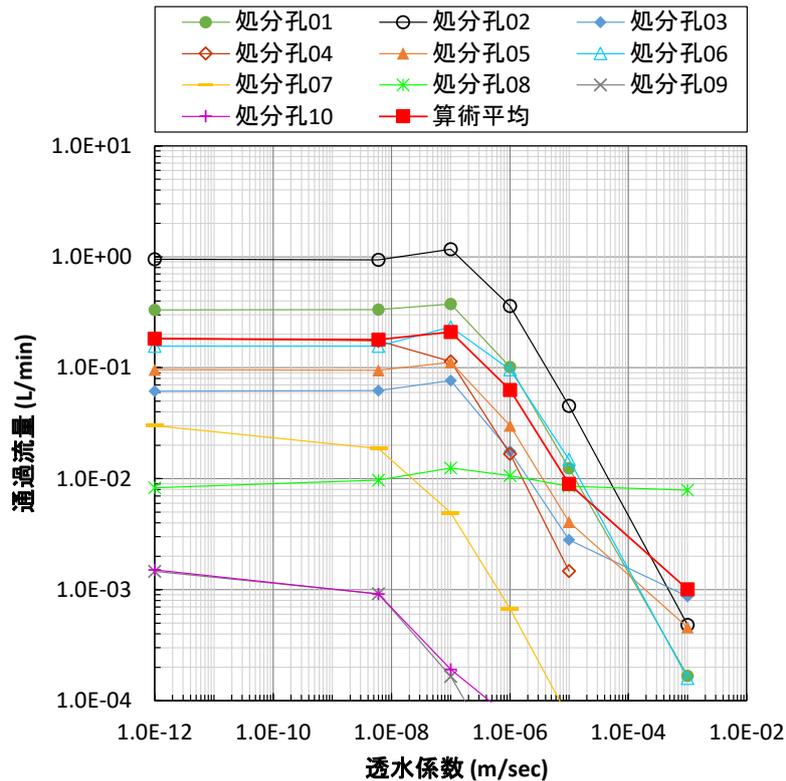


図 5.1.3-11 EDZ を考慮しない場合の各処分孔における透水性係数と処分孔直近通過流量の関係

b 緩衝材の地下水圧（全水頭）

EDZ を考慮しない条件における、緩衝材の透水性係数を変化させた際の緩衝材の地下水圧（全水頭）を算定した。まず、透水性係数の変化に対する緩衝材全体での全水頭の平均的な変動傾向を把握するため、それぞれの処分孔において緩衝材の全節点での全水頭の平均値を算定した。図 5.1.3-12 に緩衝材の平均全水頭の算定方法の概念図を示す。また、透水性係数と緩衝材の全水頭の平均値の関係を表 5.1.3-7 に、両対数グラフで表したものを図 5.1.3-13 に示す。全体として、透水性係数が小さくなるに従い全水頭が大きくなる傾向を示す。ただし、その変化傾向は単調ではなく、概ね $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/sec} \sim 1.0 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ までは透水性係数の低下に伴いべき関数的に全水頭が増加し、 $1.0 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ からは傾きが徐々に変化し、変動量が小さくなる傾向が認められる。処分孔 01 では、透水性係数が $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$ の時の全水頭が 0.11 m であったが、透水性係数が $1.0 \times 10^{-12} \text{ m/sec}$ の条件では 29.91 m まで増加した。

図 5.1.3-33～図 5.1.3-42 に緩衝材の全水頭分布図を示す。処分坑道の EDZ に位置する領域を除き、概ね透水性係数が小さくなるに従い全水頭が大きくなっていることが確認できる。また、緩衝材の下部から緩衝材上部の節点（大気圧境界）にかけて全水頭が小さくなる傾向が見取れる。ただし、いずれの処分孔でも局所的または不連続に周辺の節点と比べ全水頭が高い（もしくは低い）節点が分布しており、大気圧境界の節点からの距離に応じて単調に水頭が変化しないことが確認された。例えば、処分孔 03（図 5.1.3-16）の $z=46\text{m}$ 付近においては、同一深度でも幅の広い水頭の節点が分布していることが確認できる。

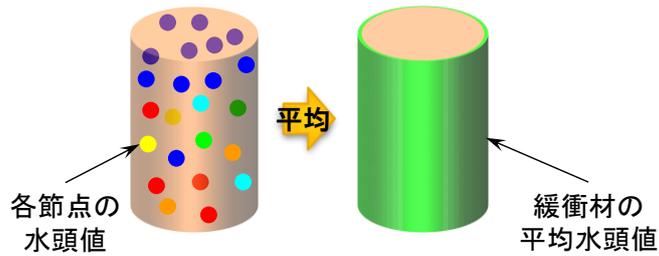


図 5.1.3-12 緩衝材の平均全水頭の算定方法の概念図

表 5.1.3-7 EDZ を考慮しない場合の各処分孔における緩衝材の全水頭（全節点の平均値）の算定結果

EDZなし 透水係数 (m/sec)	全水頭 (m)					
	1.0E-12	6.0E-09	1.0E-07	1.0E-06	1.0E-05	1.0E-03
処分孔01	29.91	28.61	21.92	5.87	0.90	0.11
処分孔02	20.91	19.71	13.21	3.35	0.47	0.04
処分孔03	19.73	17.95	7.53	1.16	0.12	0.00
処分孔04	11.32	8.60	3.22	0.71	0.10	0.02
処分孔05	1.02	0.75	0.45	0.09	0.01	0.00
処分孔06	7.85	7.12	3.72	0.74	0.11	0.01
処分孔07	9.10	7.19	2.50	0.45	0.15	0.11
処分孔08	4.21	4.57	3.17	0.70	0.14	0.04
処分孔09	0.13	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00
処分孔10	0.08	0.05	0.01	0.00	0.00	0.03
算術平均	10.43	9.46	5.57	1.31	0.20	0.04

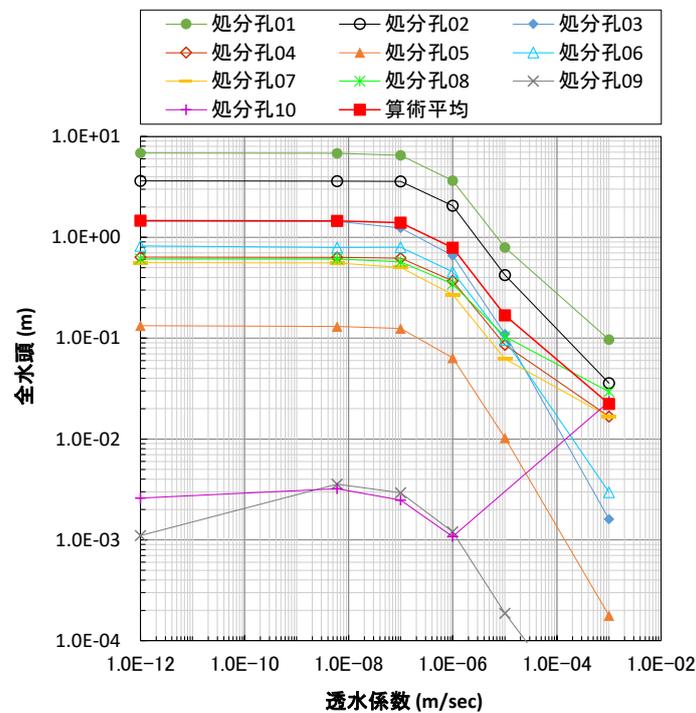


図 5.1.3-13 EDZ を考慮しない場合の各処分孔における透水係数と緩衝材の全水頭（全節点の平均値）の関係

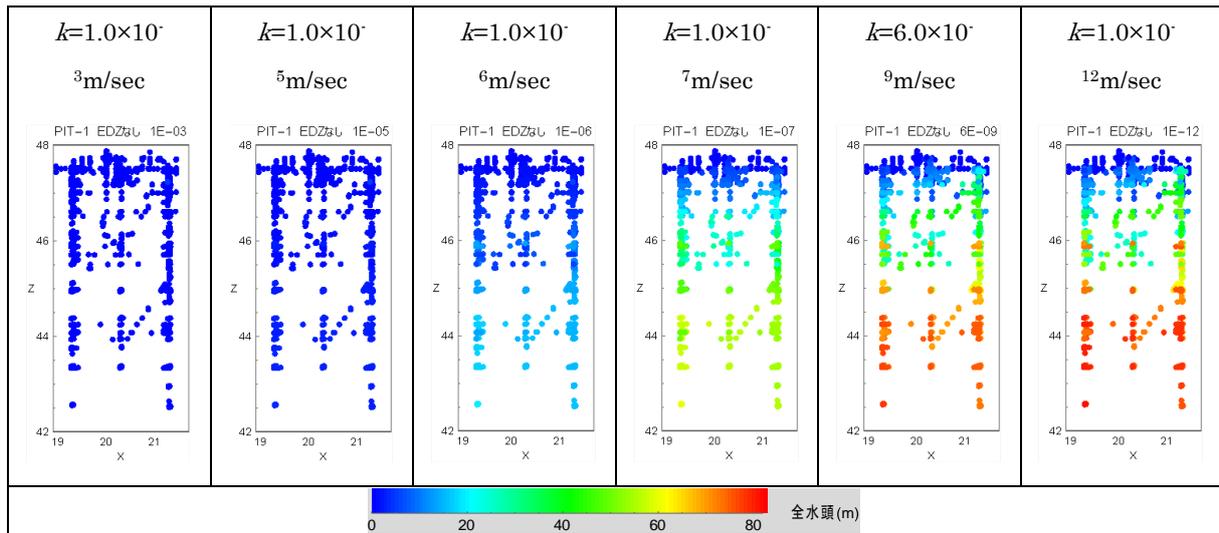


図 5.1.3-14 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 01)

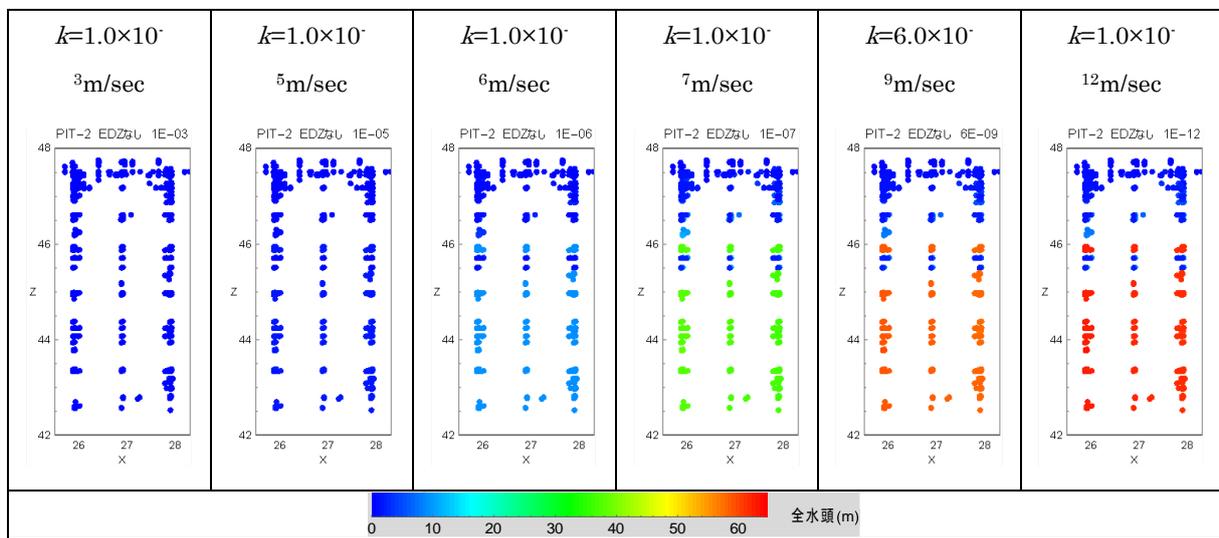


図 5.1.3-15 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 02)

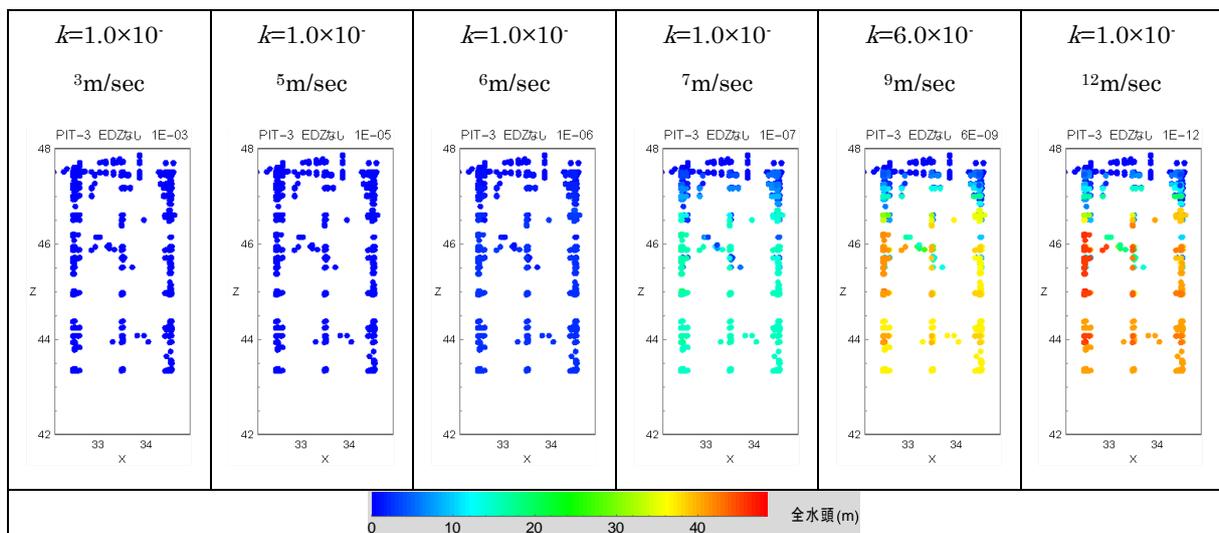


図 5.1.3-16 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 03)

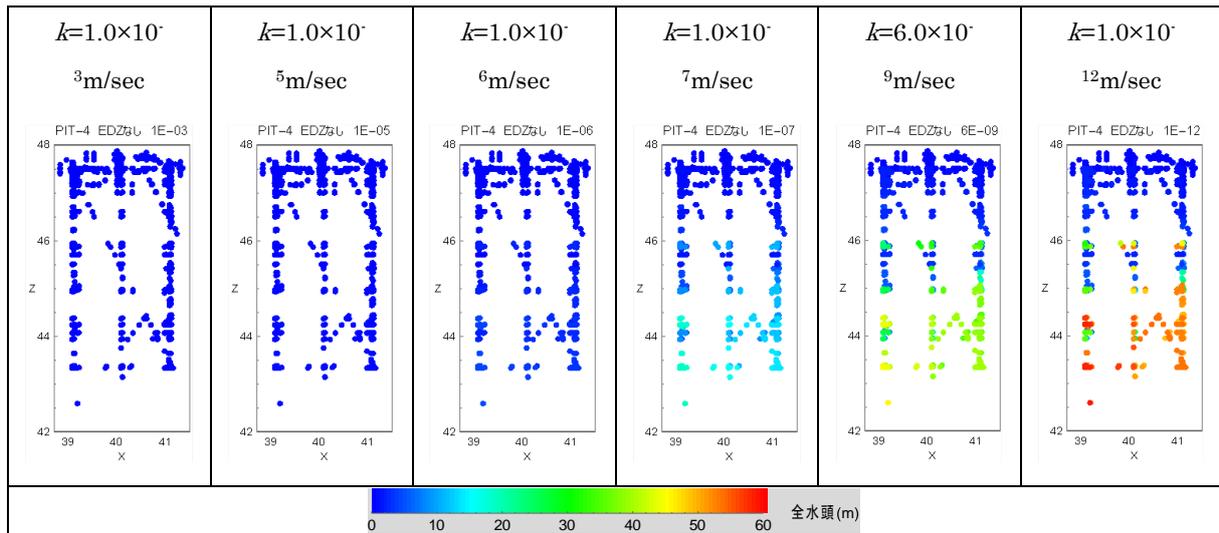


図 5.1.3-17 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 04)

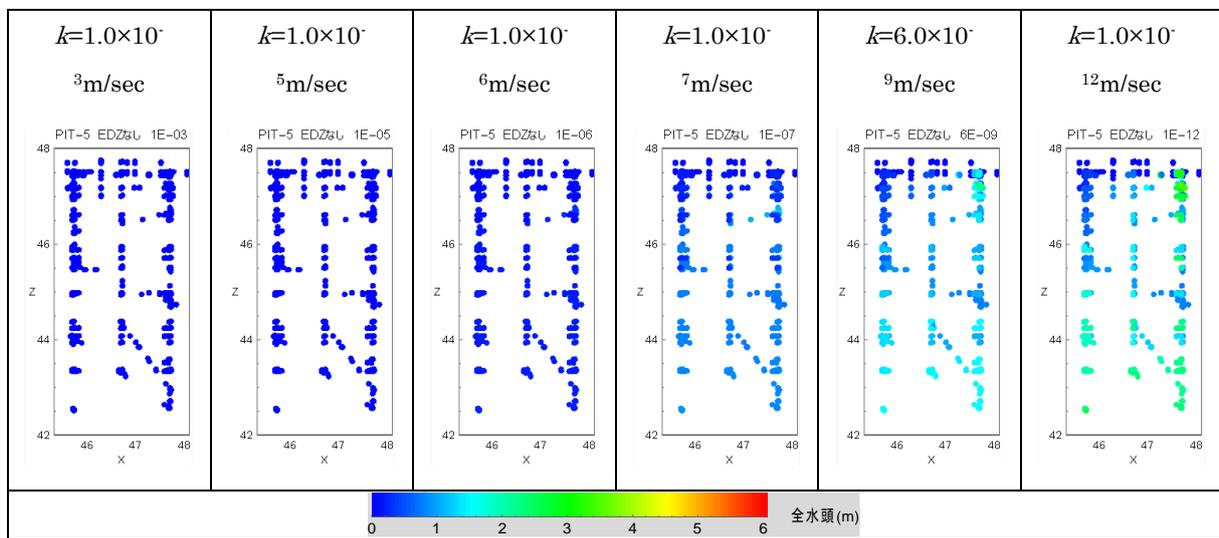


図 5.1.3-18 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 05)

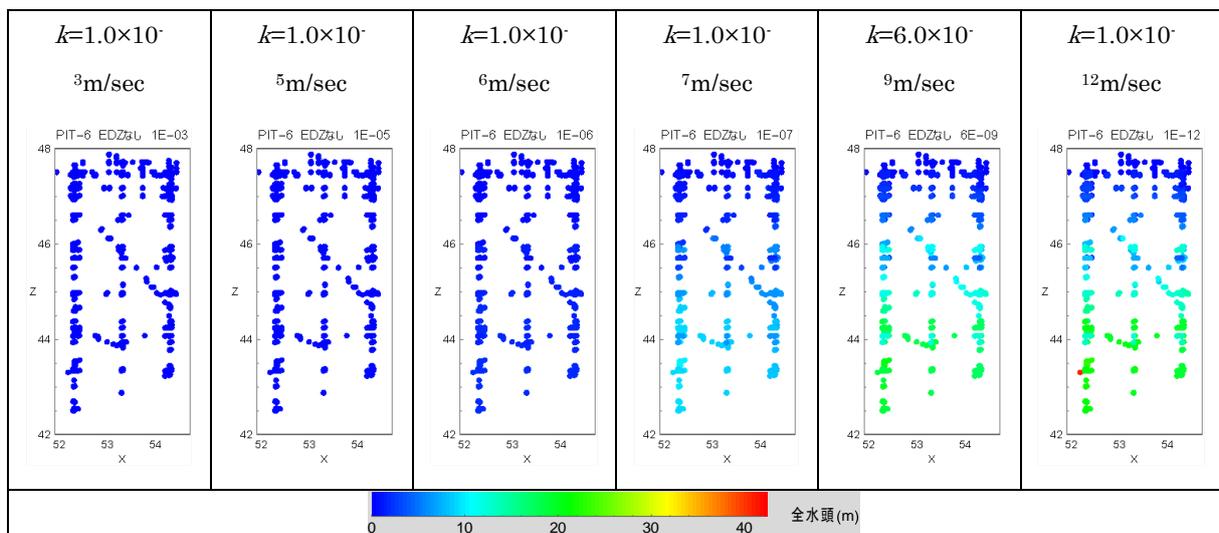


図 5.1.3-19 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 06)

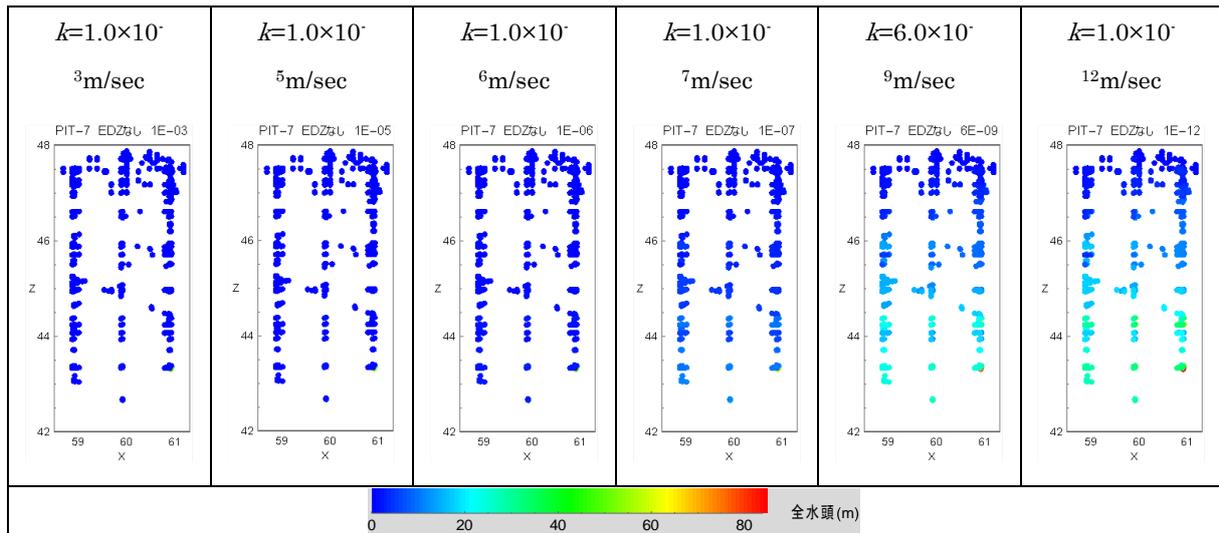


図 5.1.3-20 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 07)

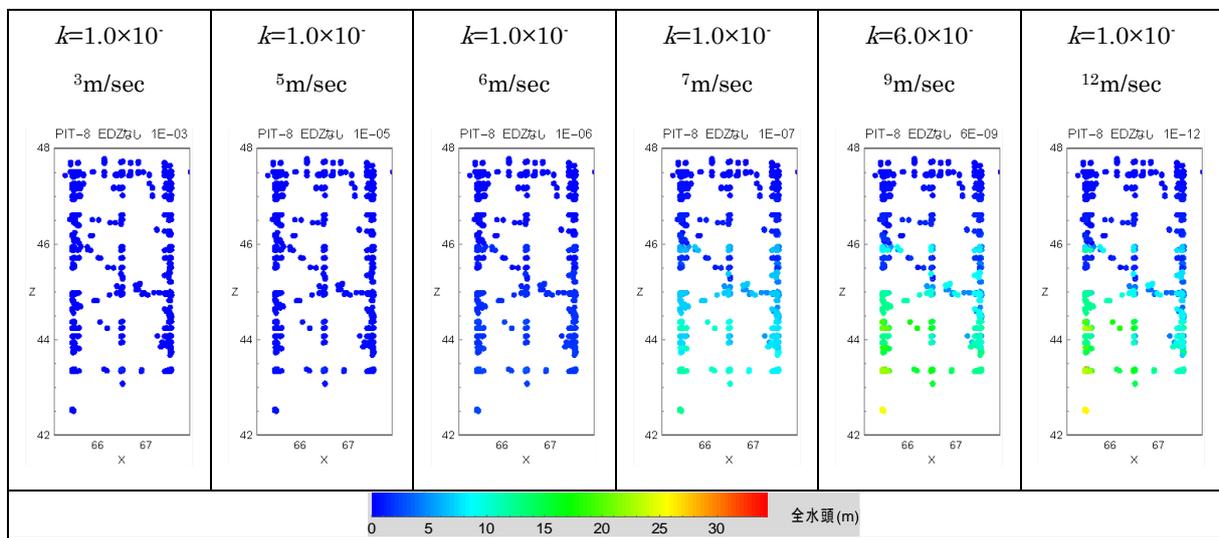


図 5.1.3-21 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 08)

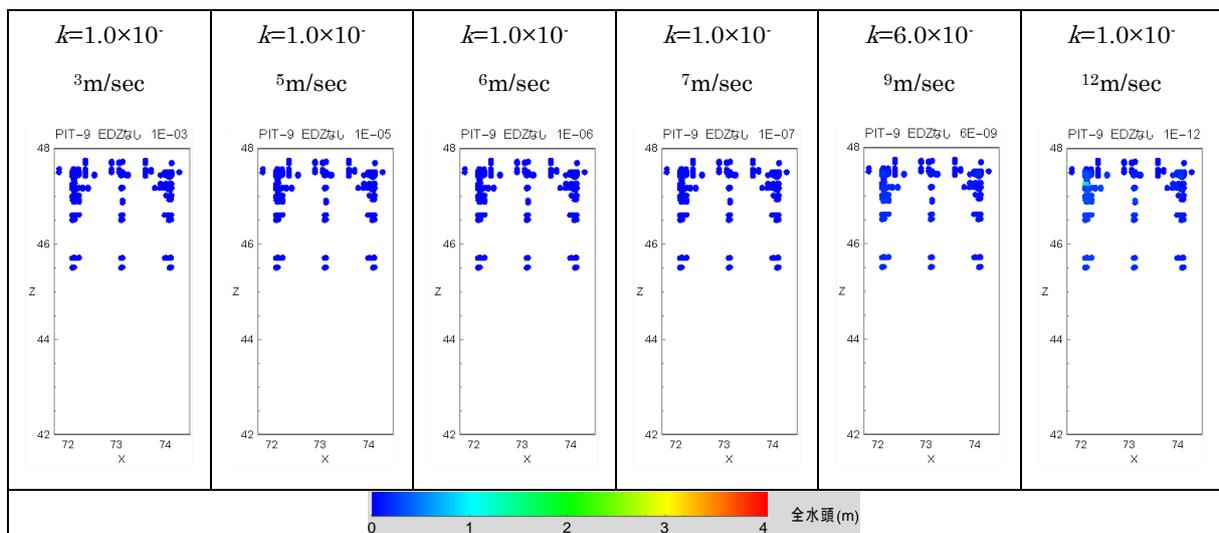


図 5.1.3-22 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 09)

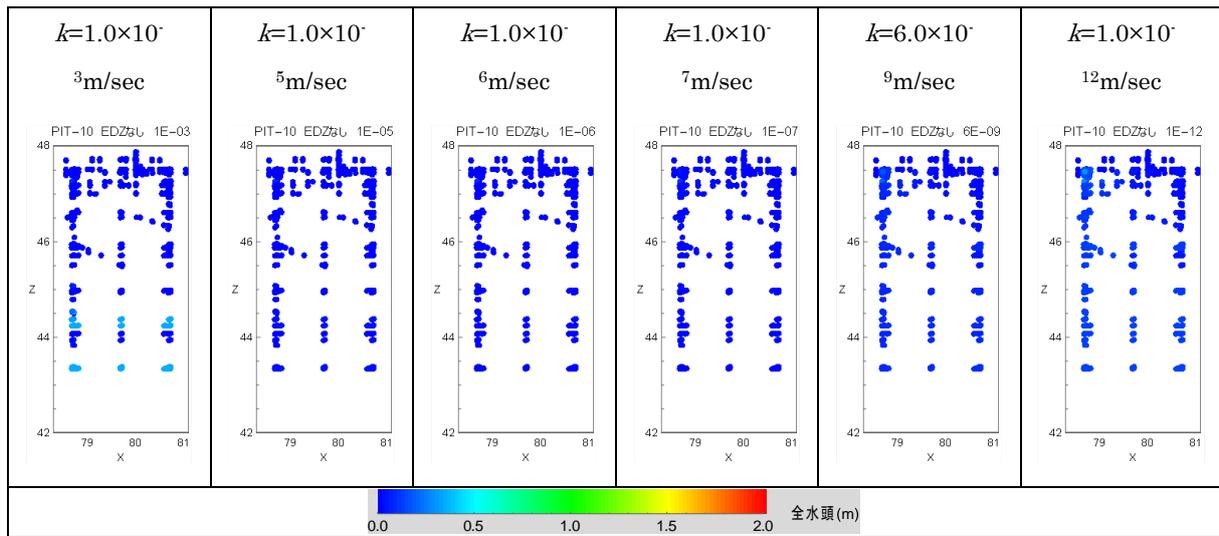


図 5.1.3-23 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図（処分孔 10）

c 緩衝材及び EDZ 通過流量についての考察

緩衝材通過流量と処分孔直近の通過流量の関係を確認する。図 5.1.3-24～図 5.1.3-26 に緩衝材と処分孔直近の通過流量、および合計流量を横軸片対数グラフで示す。全体として緩衝材の透水係数が小さくなるに従い、緩衝材通過流量は減少し、それに伴い処分孔直近の通過流量は増加する傾向である。ただし、処分孔直近の通過流量の増加量は緩衝材通過流量の減少量に比べて小さいことから、緩衝材と処分孔直近の合計通過流量は透水係数の低下に伴い減少する傾向である。これは、透水係数の低下に伴い、緩衝材の透水係数が大きい時に緩衝材を通過していた湧水が減少し、処分孔直近の領域を含む周辺の岩盤へ流動経路が変化したことが考えられる。

ここで、緩衝材の透水係数が低下することにより緩衝材の通過流量が減少し周辺領域に向かって流れることを想定して、各透水係数条件での、緩衝材通過流量、処分孔直近の通過流量の比率を算定した。この時、透水係数が i の時の緩衝材の通過流量の比率の算定方法は、緩衝材透水係数が 1.0×10^{-3} m/sec での緩衝材、処分孔直近の合計通過流量に対する緩衝材通過流量の比として定義した。以下に算定式を示す。

$$\text{緩衝材通過流量比率} = \frac{\text{緩衝材通過流量}}{\text{透水係数が } 1.0 \times 10^{-3} \text{ の時の緩衝材, 処分孔直近の合計通過流量}}$$

同様に、処分孔直近の通過流量の比率は合計通過流量に対する処分孔直近の通過流量の比として定義した。以下に算定式を示す。

$$\text{処分孔直近通過流量比率} = \frac{\text{処分孔直近通過流量}}{\text{透水係数が } 1.0 \times 10^{-3} \text{ の時の緩衝材, 処分孔直近の合計通過流量}}$$

図 5.1.3-27～図 5.1.3-29 に各領域の通過流量の比率を示す。緩衝材の透水係数が 1.0×10^{-3}

m/sec \sim 1.0 \times 10⁻⁵ m/sec の時は、ほぼすべての湧水が緩衝材を通過して流出している。しかし、緩衝材の透水係数が小さくなるに従い緩衝材通過流量の比率が減少していき、処分孔直近の通過流量比率が増加していく。また、緩衝材の透水係数が低下するに伴い、緩衝材通過流量の比率と処分孔直近の通過流量の比の合計値が小さくなっていることが確認できる。これは、周辺の総水勾配が変化したことにより緩衝材および処分孔直近を流れていた湧水が、処分孔の周辺岩盤に向かって流れるようになったことを示している。最終的に緩衝材の透水係数が 1.0 \times 10⁻¹² m/sec まで低下した場合には、緩衝材通過流量の比率は平均で 2 割以下まで低下し、処分孔通過流量、および周辺岩盤に向かって流れる流量の比率は合わせて 8 割程度まで増加した。以上より、処分孔に緩衝材を定置し処分孔の透水係数が低下することで、処分孔に流出していた湧水は減少し、周辺の岩盤に向かう流れが増加したことが考えられる。

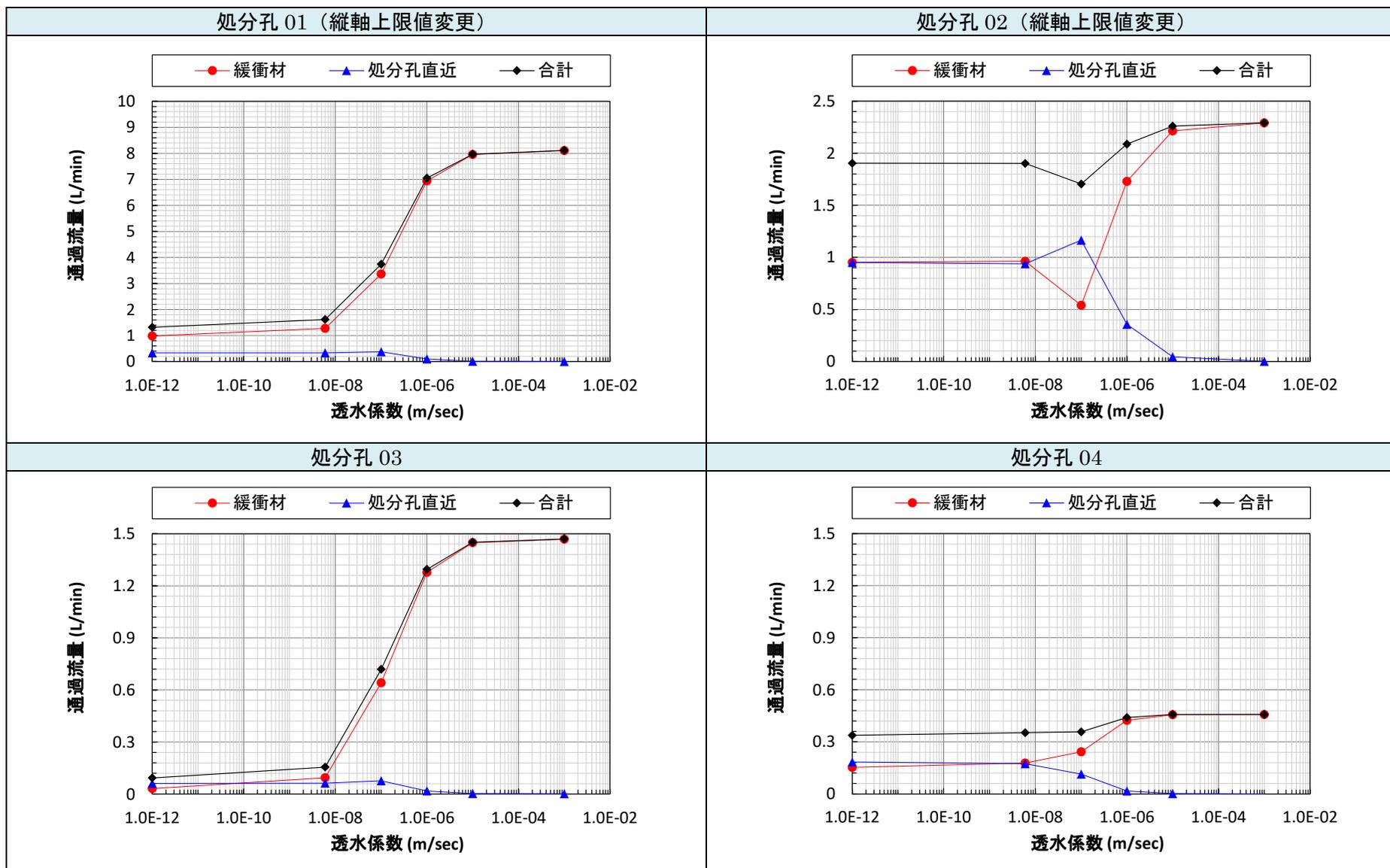


図 5.1.3-24 EDZ を考慮しない場合の緩衝材および処分孔直近通過流量の関係 (1)

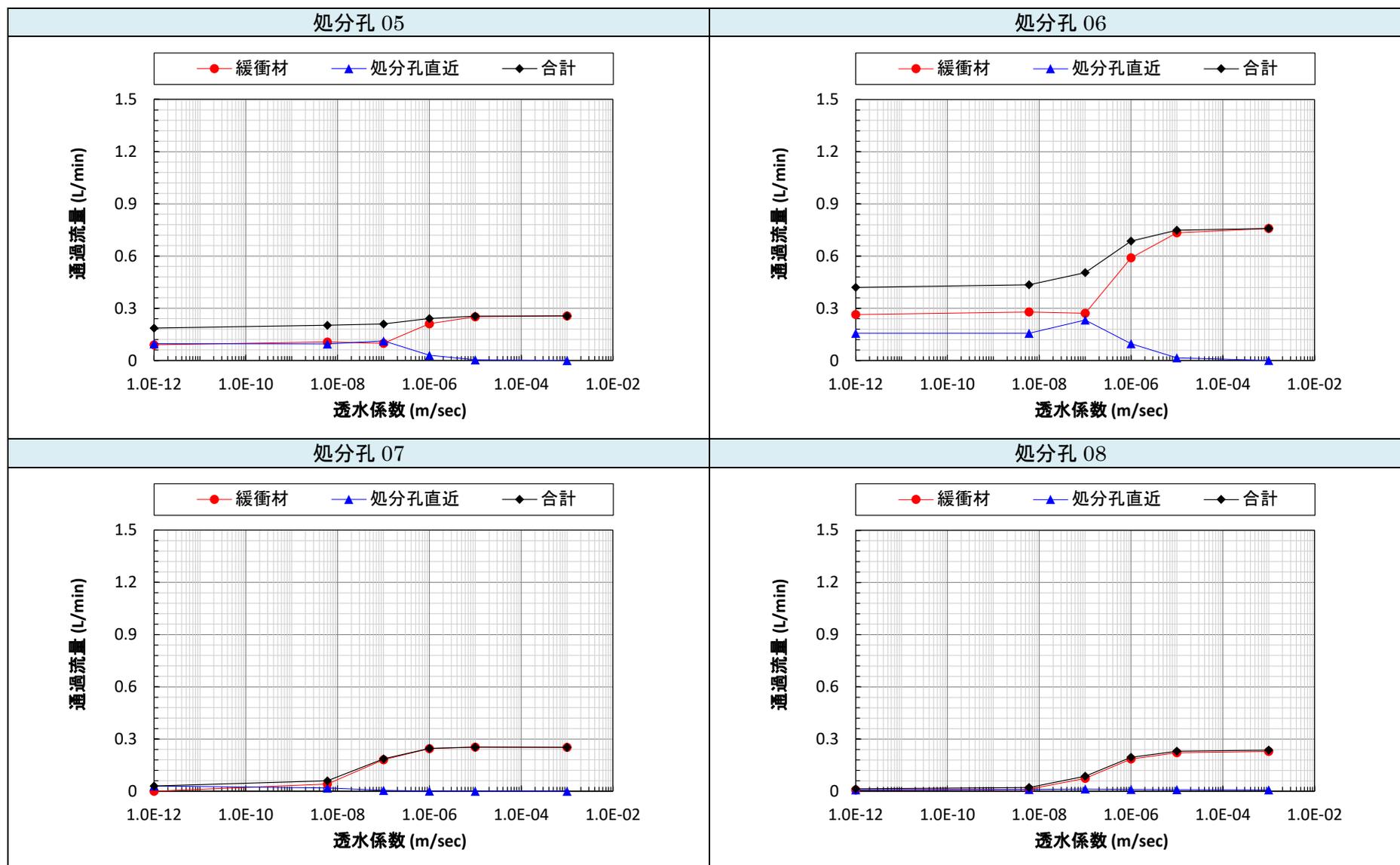


図 5.1.3-25 EDZ を考慮しない場合の緩衝材および処分孔直近通過流量の関係 (2)

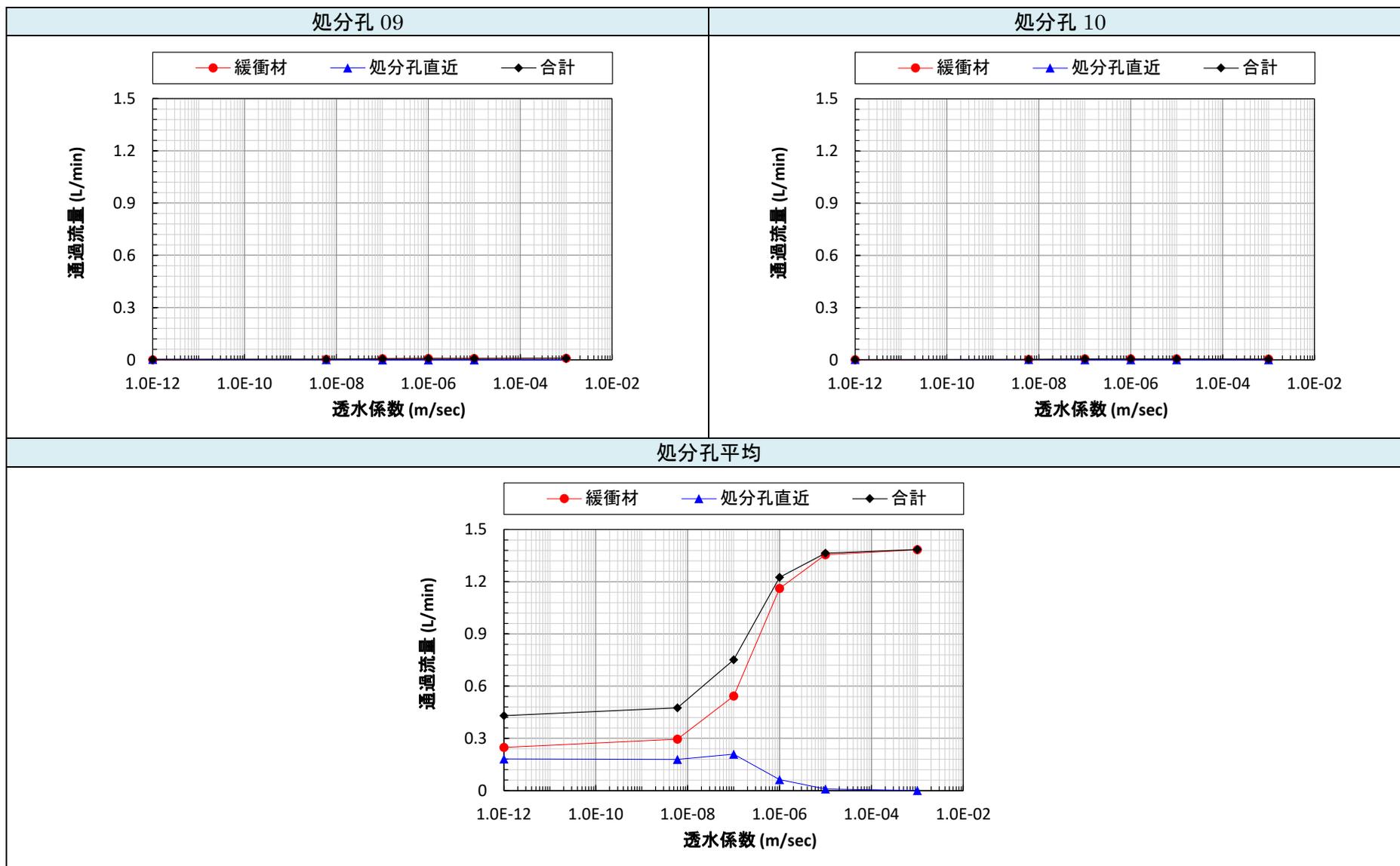


図 5.1.3-26 EDZ を考慮しない場合の緩衝材および処分孔直近通過流量の関係 (3)

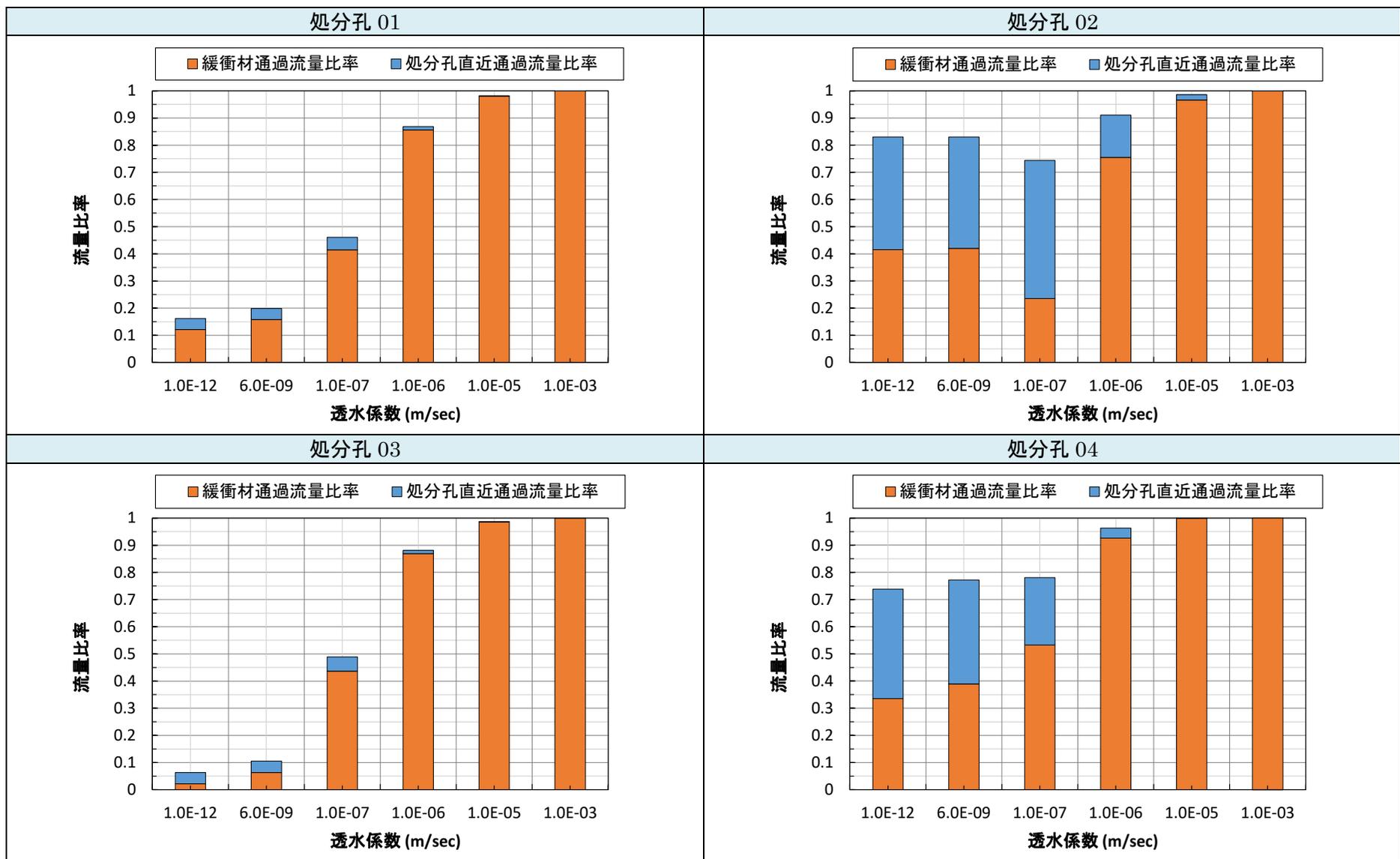


図 5.1.3-27 EDZ を考慮しない場合の、各領域の通過流量の比率 (1)

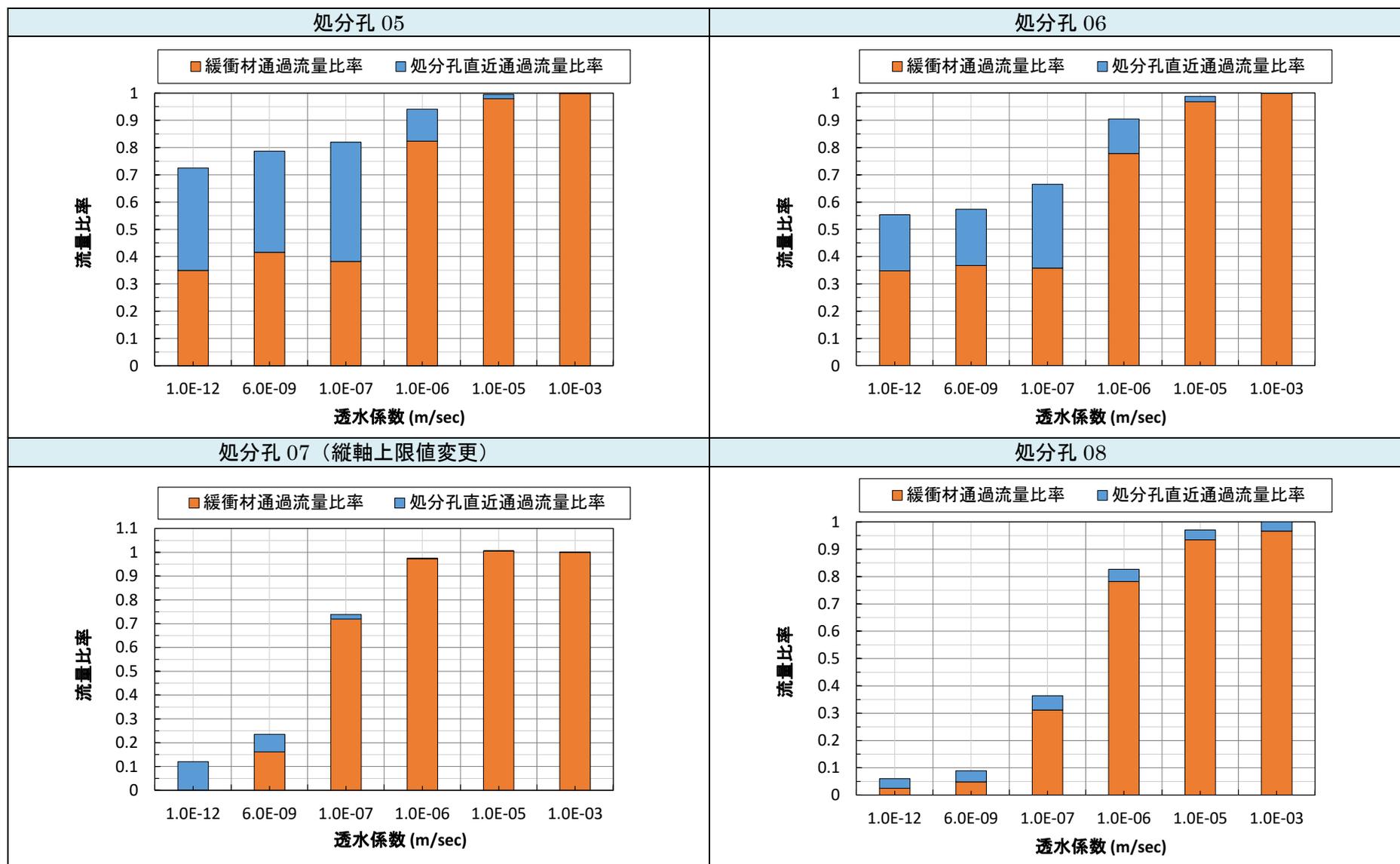


図 5.1.3-28 EDZ を考慮しない場合の、各領域の通過流量の比率 (2)

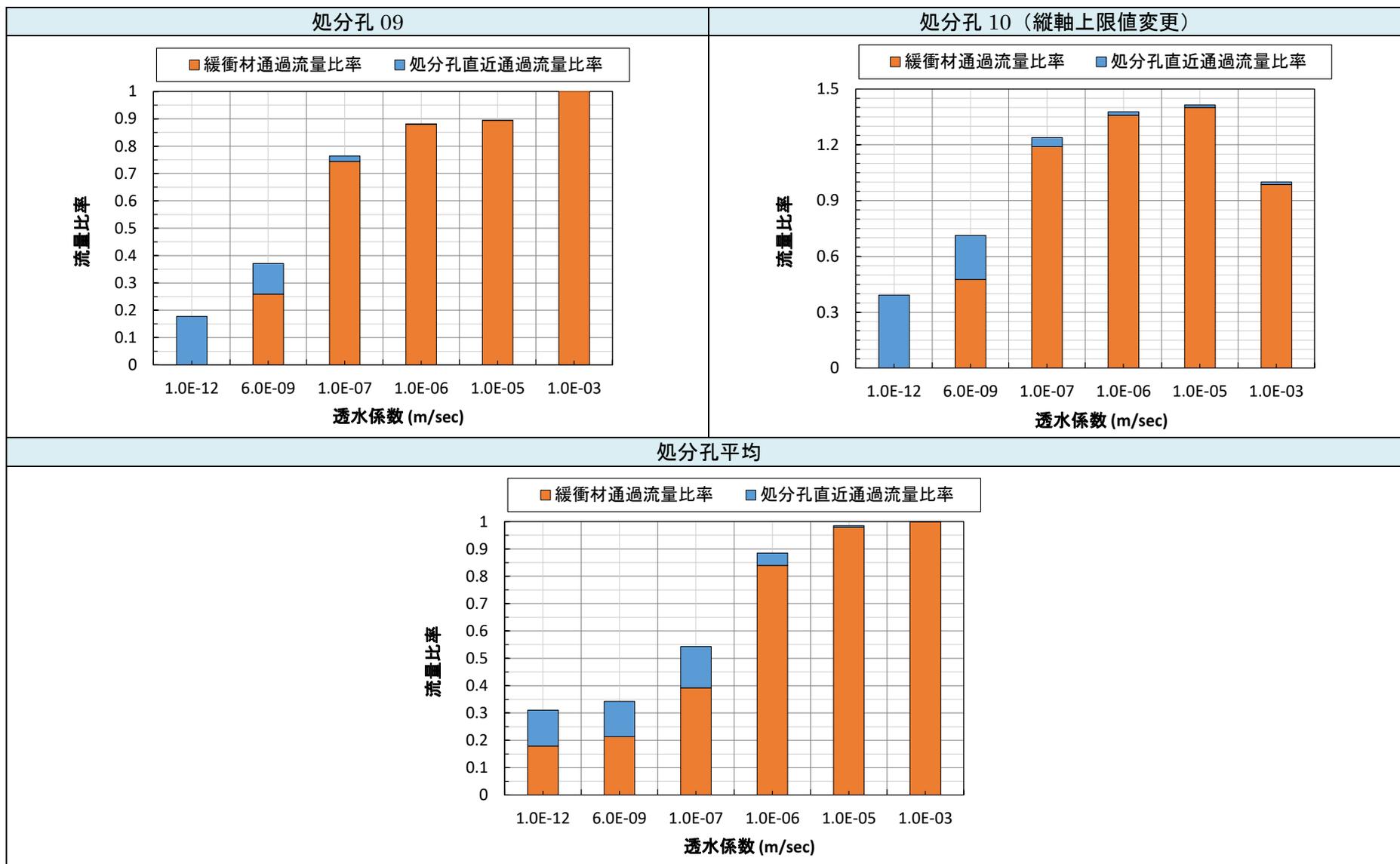


図 5.1.3-29 EDZ を考慮しない場合の、各領域の通過流量の比率 (3)

2) EDZ を考慮する条件

EDZ を考慮した条件における、緩衝材の透水係数を変化させた際の緩衝材通過流量および EDZ 通過流量を算定した。5)で述べた通り、EDZ/健岩部境界のパイプに対して、EDZ の透水係数 (1.0×10^{-6} m/sec) を設定することで EDZ をモデル化している。

a 処分孔周辺の通過流量

● 緩衝材通過流量

緩衝材の通過流量について確認する。緩衝材通過流量の算定結果を表 5.1.3-8 に、透水係数と緩衝材の通過流量の関係を両対数で表したグラフを図 5.1.3-30 に示す。概ねいずれのリアライゼーションでも透水係数が小さくなるにつれて流量は減少する傾向である。ただし、その変化傾向は単調ではなく概ね緩衝材の透水係数が 1.0×10^{-3} m/sec $\sim 1.0 \times 10^{-5}$ m/sec の間は減少量が小さく、 1.0×10^{-5} m/sec $\sim 6.0 \times 10^{-9}$ m/sec の間では減少量が大きくなり、再び 6.0×10^{-9} m/sec からは減少量が小さくなる傾向を示す。処分孔 07、処分孔 09、処分孔 10 については、透水係数が 6.0×10^{-9} m/sec より小さい場合でも流量が減少を続ける傾向を示した。また、処分孔 02、処分孔 05、処分孔 06 については、透水係数が 1.0×10^{-7} m/sec から 6.0×10^{-9} m/sec にかけて通過流量が増加するという結果が見られた。これらの変化傾向は、EDZ を考慮しない場合の解析結果と類似している。

● EDZ 通過流量

EDZ の通過流量について確認する。EDZ の通過流量の算定結果を表 5.1.3-9 に、透水係数と EDZ の通過流量の関係を両対数で表したグラフを図 5.1.3-31 に示す。ここでの EDZ の通過流量は、EDZ/健岩部の境界に配置したパイプ (EDZ の透水係数を設定) を通過し、大気圧境界を設定した節点 (処分坑道との接地面における) において流出する流量を示す。概ね、 1.0×10^{-3} m/sec $\sim 1.0 \times 10^{-7}$ m/sec の間では、緩衝材の透水係数の低下に伴い、べき関数的に通過流量が増加していく。 1.0×10^{-7} m/sec からは傾きが大きく変化し、変動量が小さくなる傾向が認められた。この変動傾向は EDZ を考慮しない場合の処分孔直近の通過流量の解析結果と傾向が類似している。

表 5.1.3-8 EDZ を考慮した場合の緩衝材通過流量算定結果

EDZあり 透水係数 (m/sec)	緩衝材通過流量(L/min)					
	1.0E-12	6.0E-09	1.0E-07	1.0E-06	1.0E-05	1.0E-03
処分孔01	0.40	0.50	1.52	5.27	7.70	8.18
処分孔02	0.51	0.52	0.32	1.33	2.12	2.29
処分孔03	0.03	0.04	0.22	0.87	1.37	1.47
処分孔04	0.02	0.02	0.05	0.24	0.41	0.46
処分孔05	0.04	0.04	0.04	0.16	0.24	0.26
処分孔06	0.17	0.17	0.11	0.41	0.70	0.76
処分孔07	0.00	0.00	0.06	0.22	0.30	0.32
処分孔08	0.03	0.04	0.05	0.13	0.20	0.22
処分孔09	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
処分孔10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
算術平均	0.12	0.13	0.24	0.86	1.30	1.40

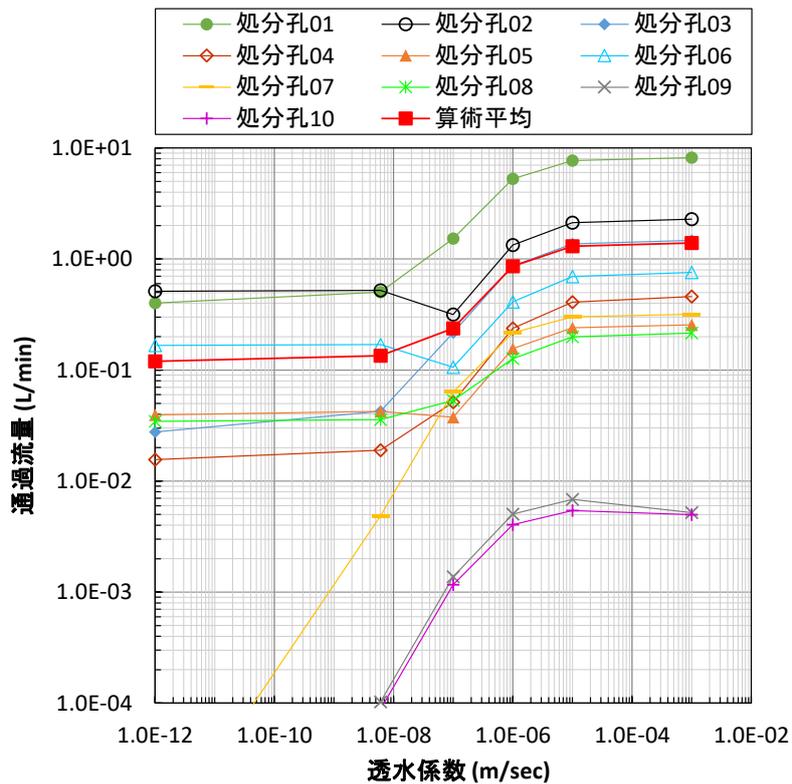


図 5.1.3-30 EDZ を考慮した場合の透水係数と緩衝材通過流量の関係

表 5.1.3-9 EDZ を考慮した場合の EDZ 部通過流量算定結果

EDZあり 透水係数 (m/sec)	EDZ通過流量(L/min)					
	1.0E-12	6.0E-09	1.0E-07	1.0E-06	1.0E-05	1.0E-03
処分孔01	6.34	6.25	5.35	2.23	0.36	0.01
処分孔02	1.55	1.54	1.70	0.81	0.14	0.00
処分孔03	1.23	1.21	1.05	0.50	0.09	0.00
処分孔04	0.43	0.43	0.40	0.22	0.05	0.00
処分孔05	0.19	0.19	0.19	0.09	0.01	0.00
処分孔06	0.52	0.51	0.57	0.31	0.06	0.00
処分孔07	0.30	0.29	0.24	0.09	0.01	0.00
処分孔08	0.18	0.18	0.16	0.08	0.02	0.01
処分孔09	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
処分孔10	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
算術平均	1.07	1.06	0.97	0.43	0.08	0.00

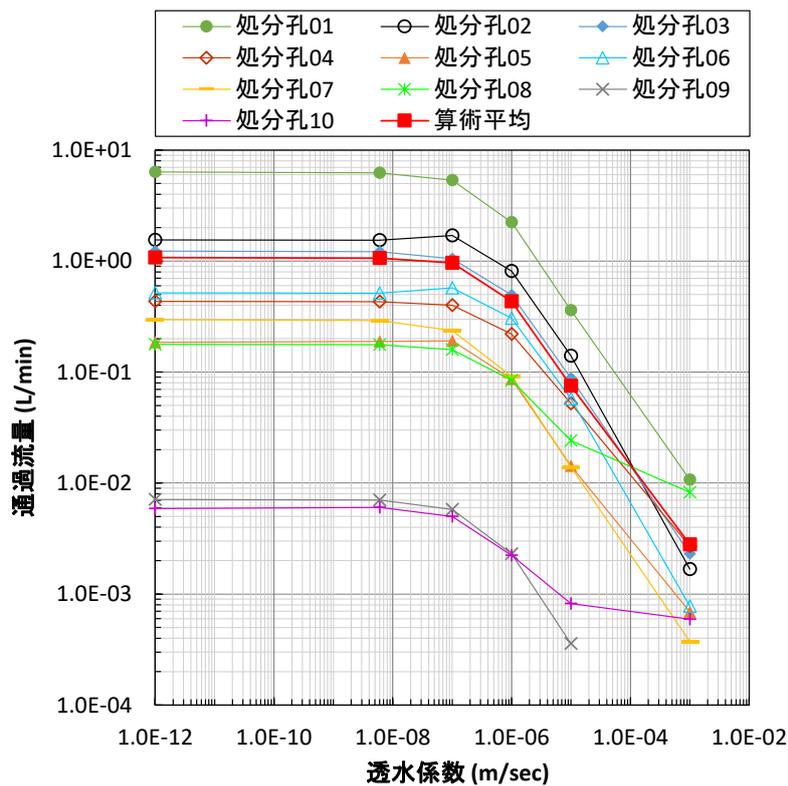


図 5.1.3-31 EDZ を考慮した場合の透水係数と EDZ 部通過流量の関係

b 緩衝材の地下水圧（全水頭）

EDZ を考慮する条件における、緩衝材の透水係数を変化させた際の緩衝材の地下水圧（全水頭）を算定した。まず、透水係数の変化に対する緩衝材全体での全水頭の平均的な変動傾向を把握するため、それぞれの処分孔において緩衝材の全節点での全水頭の平均値を算定した。透水係数と緩衝材全体での平均の全水頭の間を関係を表 5.1.3-7 に整理する。また両対数グラフで表したものを図 5.1.3-32 に示す。全体として、透水係数が小さくなるに従い全水頭が大きくなる傾向を示す。ただし、その変化傾向は単調ではなく、概ね $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/sec} \sim 1.0 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ の間では透水係数の低下に伴いべき関数的に全水頭が増加し、 $1.0 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ からは傾きが大きく変化し、変動量が小さくなる傾向が認められる。処分孔 01 では、透水係数が $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$ の時の全水頭が 0.10 m であったが、透水係数が $1.0 \times 10^{-12} \text{ m/sec}$ の条件では 6.84 m まで増加した。この変化傾向は、EDZ を考慮しない条件での解析結果と類似しており、値としては全体的に小さい傾向である。

図 5.1.3-33～図 5.1.3-42 に緩衝材の全水頭分布図を示す。こちらも EDZ を考慮しない場合と同様に、緩衝材の透水係数が小さくなるに従い、処分坑道の EDZ に位置する領域を除き、全体的に全水頭が大きくなる傾向となった。また、いずれの処分孔でも局所的または不連続に全水頭が高い（もしくは低い）節点が分布しており、大気圧境界の節点からの距離に応じて単調に全水頭が変化しないことが確認された。この傾向は EDZ の考慮の有無に関わらず確認される。

表 5.1.3-10 EDZ を考慮する場合の緩衝材の全水頭算定結果

EDZあり 透水係数 (m/sec)	全水頭 (m)					
	1.0E-12	6.0E-09	1.0E-07	1.0E-06	1.0E-05	1.0E-03
処分孔01	6.84	6.80	6.50	3.65	0.79	0.10
処分孔02	3.62	3.60	3.59	2.05	0.42	0.04
処分孔03	1.44	1.44	1.24	0.66	0.11	0.00
処分孔04	0.64	0.63	0.62	0.37	0.09	0.02
処分孔05	0.13	0.13	0.12	0.06	0.01	0.00
処分孔06	0.82	0.79	0.80	0.46	0.10	0.00
処分孔07	0.56	0.56	0.50	0.27	0.06	0.02
処分孔08	0.61	0.61	0.57	0.34	0.10	0.03
処分孔09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
処分孔10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
算術平均	1.47	1.46	1.40	0.79	0.17	0.02

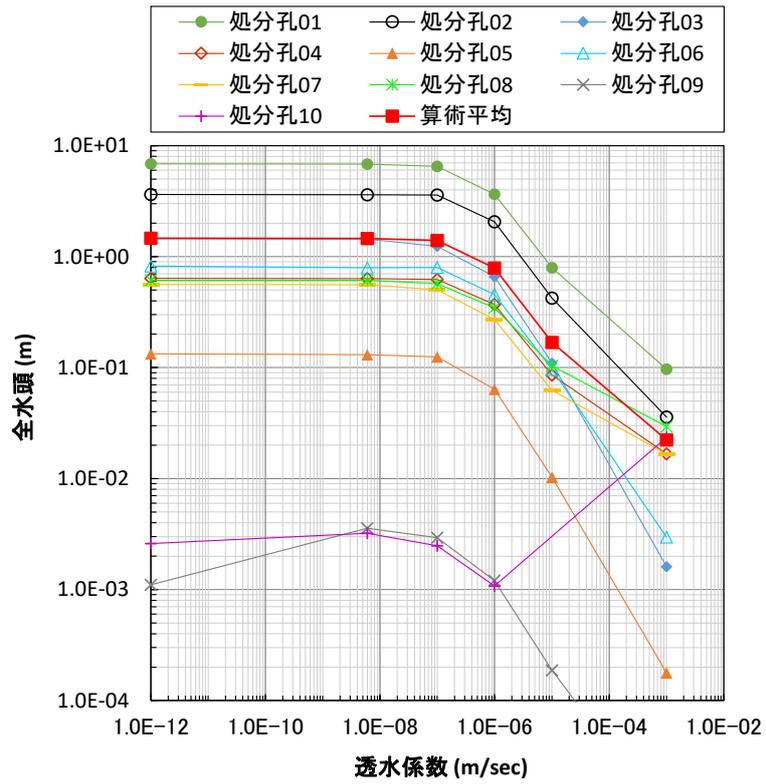


図 5.1.3-32 EDZ を考慮する場合の透水係数と緩衝材の全水頭の関係

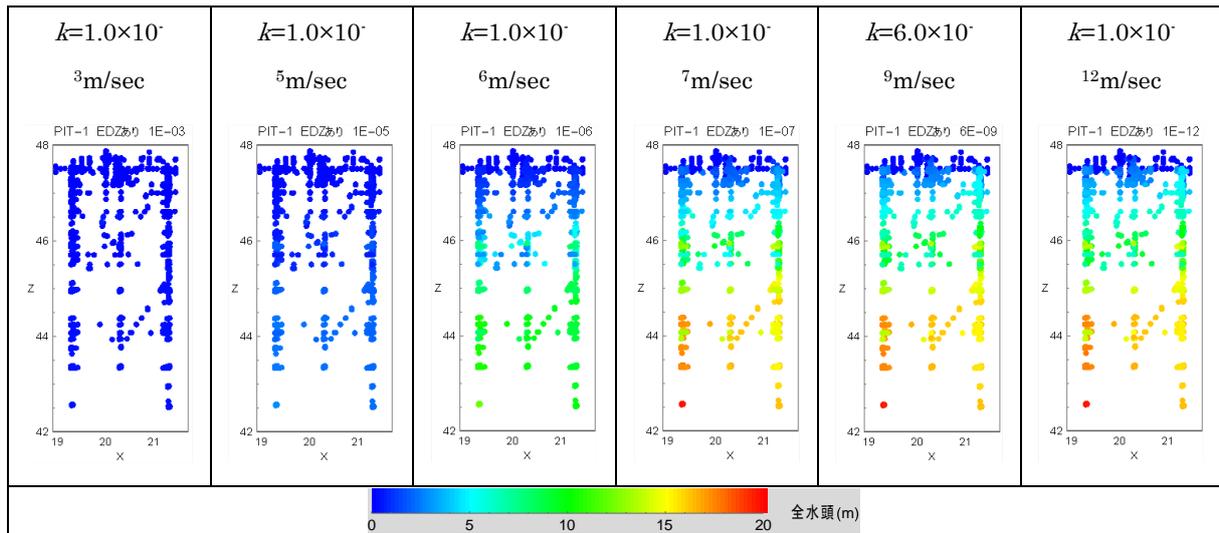


図 5.1.3-33 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 01)

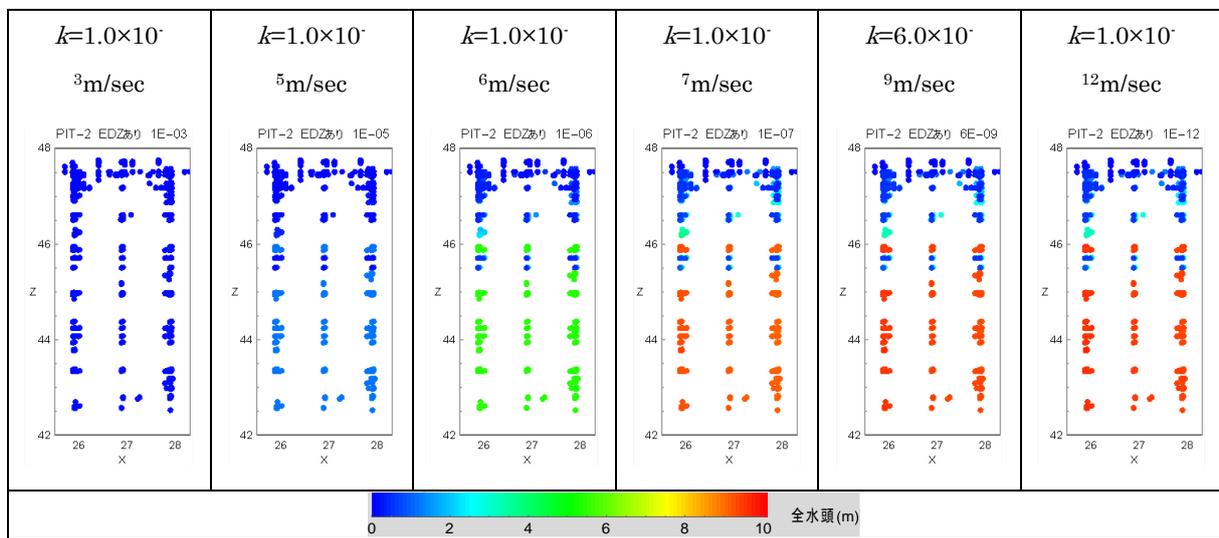


図 5.1.3-34 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 02)

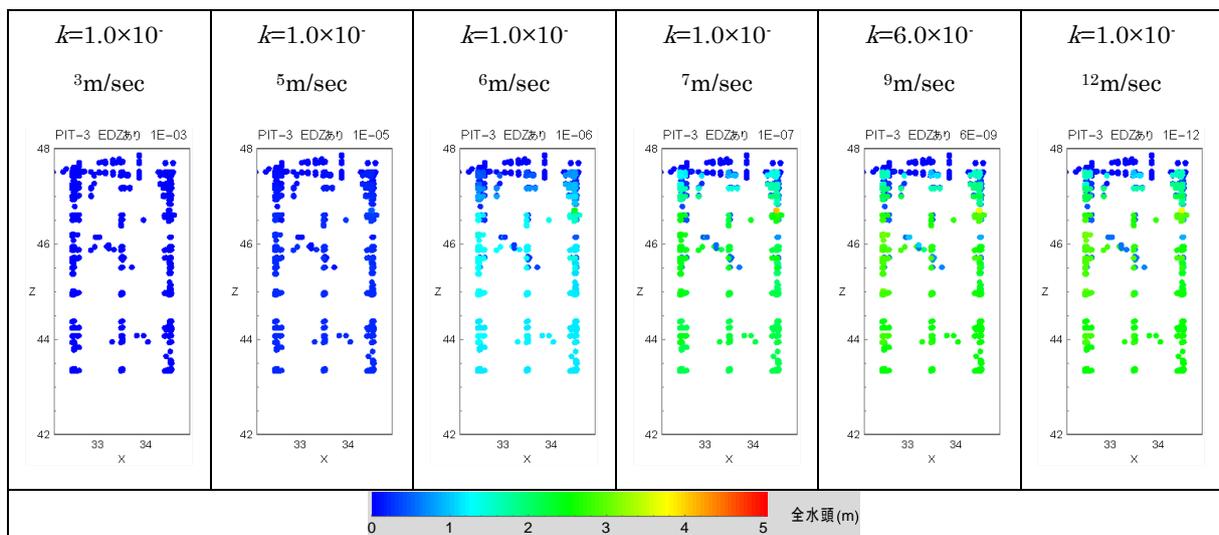


図 5.1.3-35 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 03)

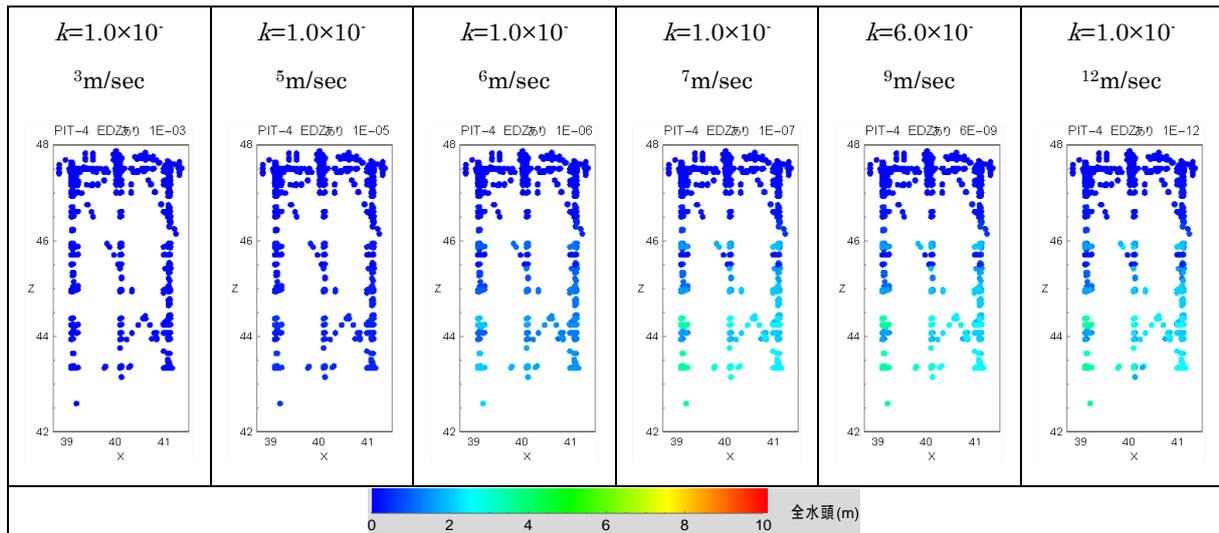


図 5.1.3-36 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 04)

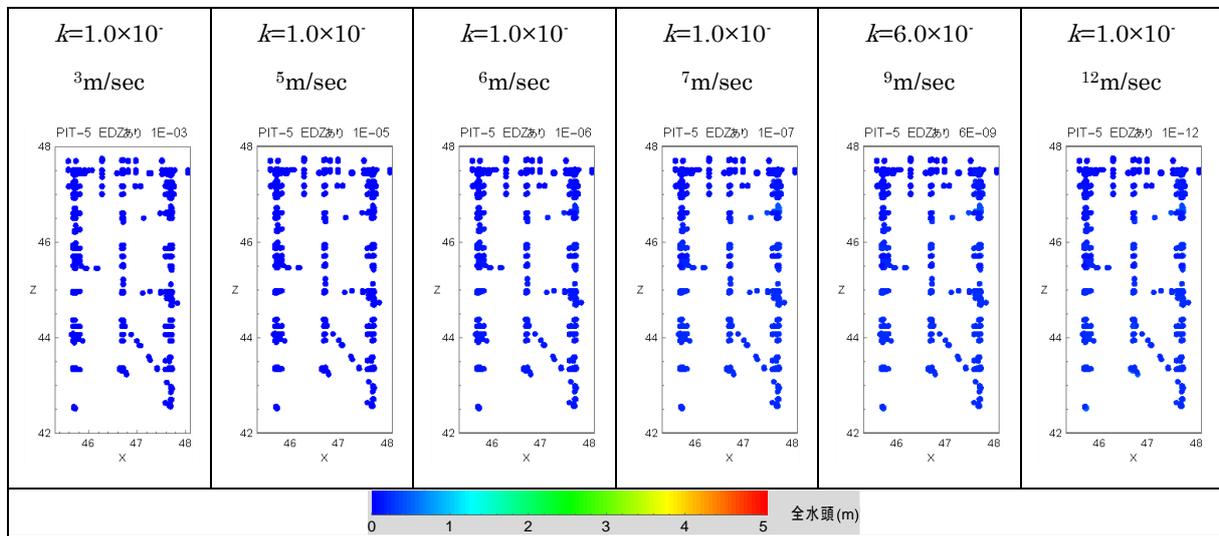


図 5.1.3-37 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 05)

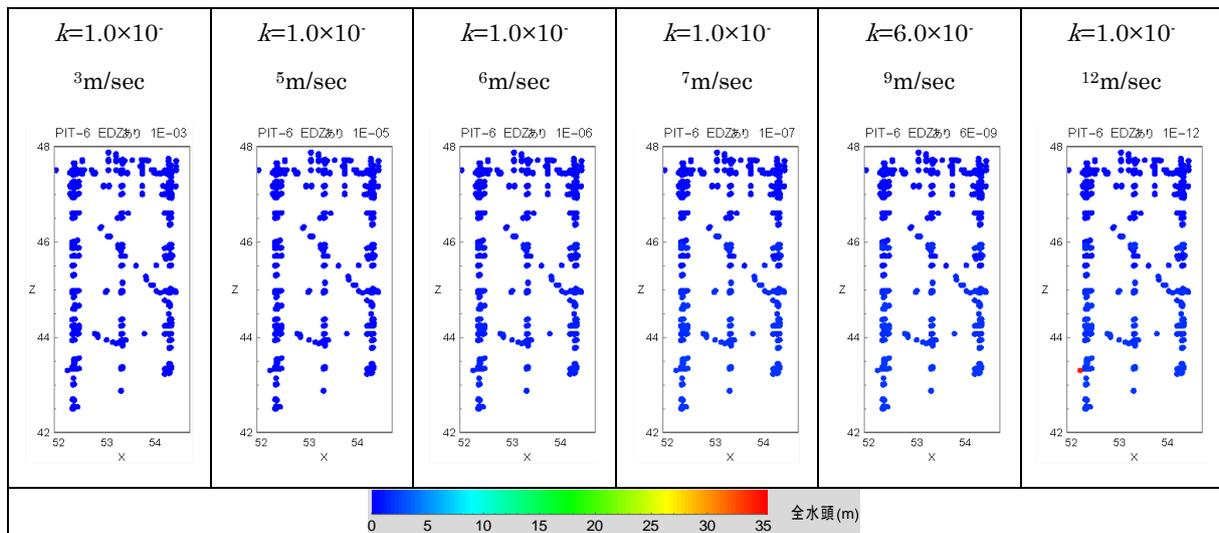


図 5.1.3-38 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 06)

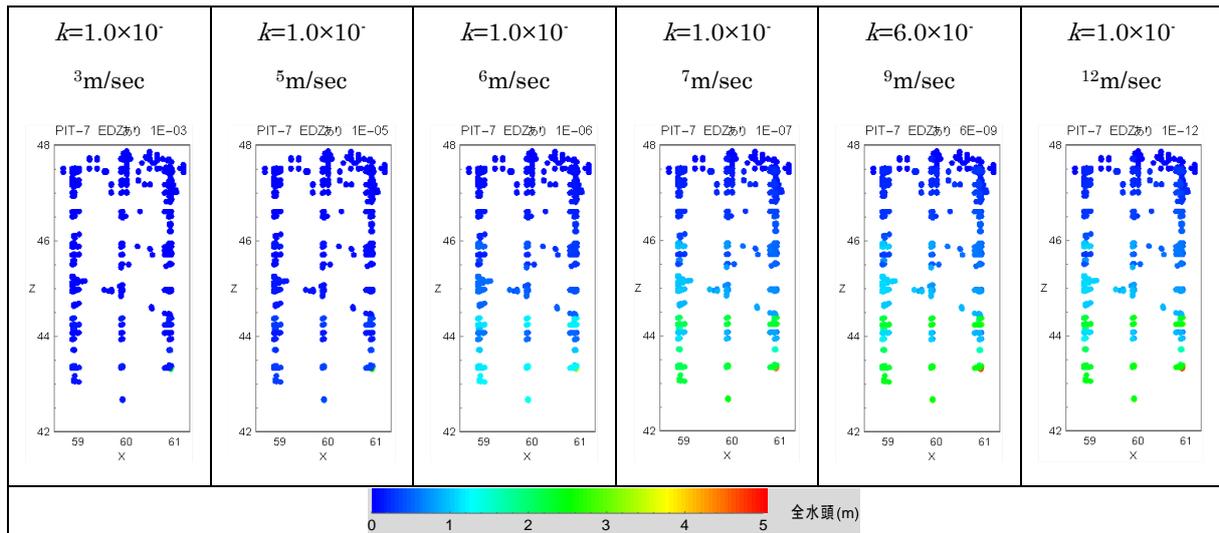


図 5.1.3-39 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 07)

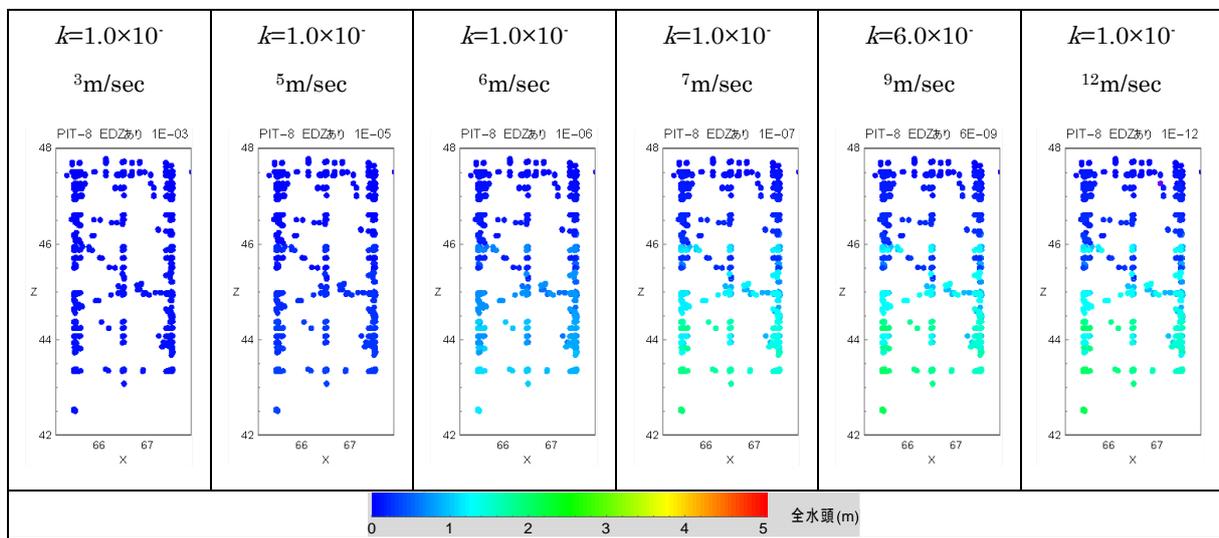


図 5.1.3-40 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 08)

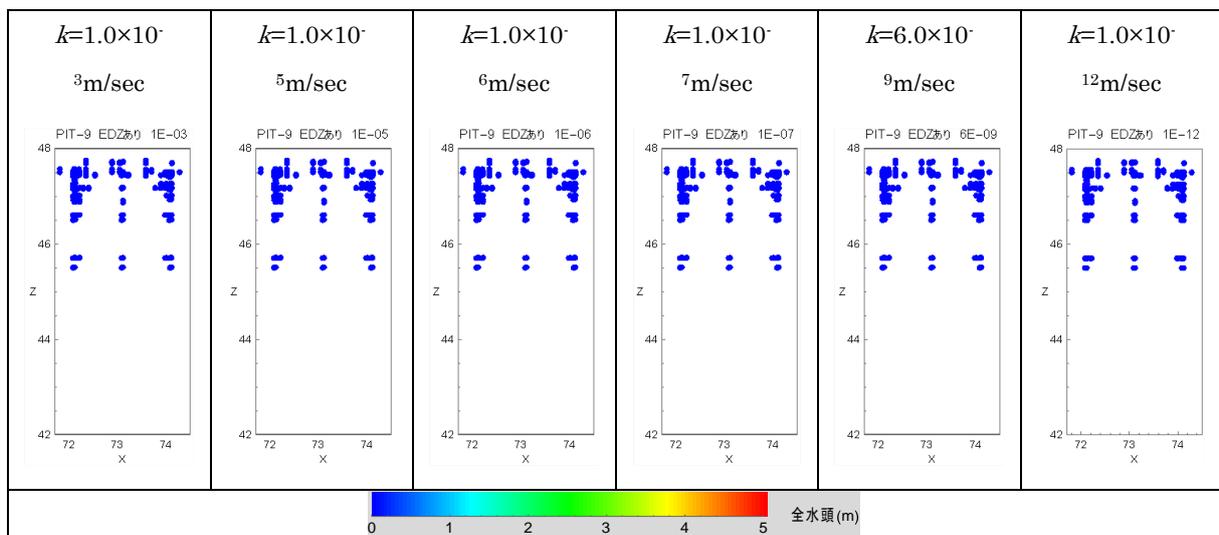


図 5.1.3-41 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図 (処分孔 09)

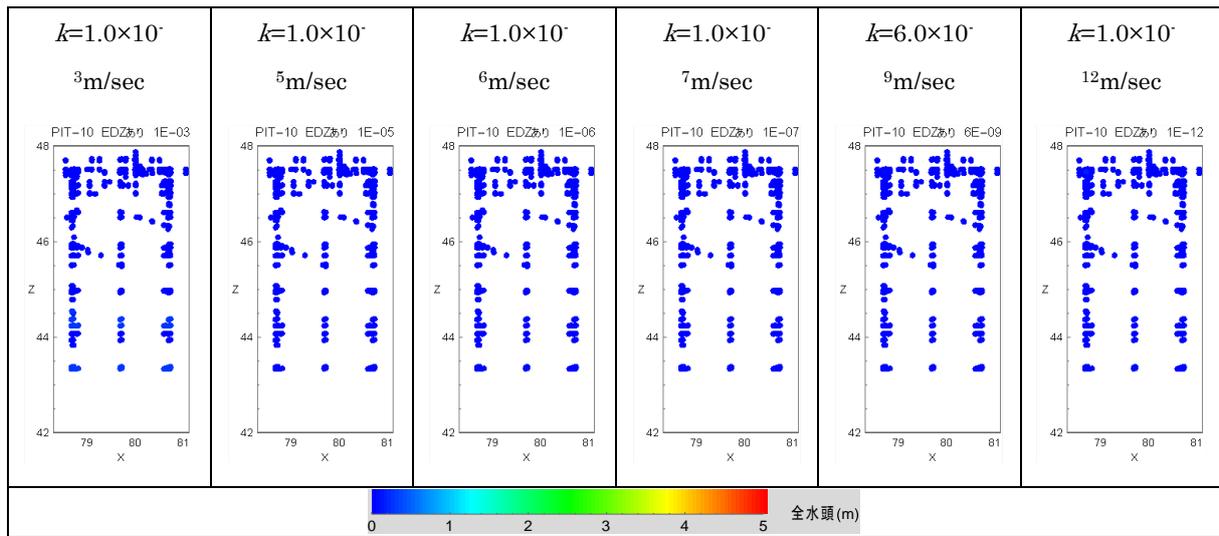


図 5.1.3-42 緩衝材の透水係数を変化させたときの緩衝材の全水頭分布図（処分孔 10）

c 緩衝材及び EDZ 通過流量についての考察

緩衝材の通過流量と EDZ の通過流量の関係を確認する。図 5.1.3-43～図 5.1.3-45 に緩衝材と EDZ の通過流量、およびそれらの合計流量を示す。概ね緩衝材の透水係数が小さくなるに従い、緩衝材の通過流量は減少し、それに伴い EDZ 通過流量は増加する傾向である。これは、EDZ を考慮しない場合の緩衝材と処分孔流量の通過流量の変動傾向と類似している。

ここで、1)と同様の方法により、緩衝材の透水係数が低下することにより周辺の動水勾配が変化し、緩衝材を通過していた湧水が EDZ を含む周辺領域に向かって流れることを想定して、各透水係数条件での、緩衝材通過流量、EDZ 通過流量の比率を算定した。ただし、EDZ の通過流量の比率は合計通過流量に対する EDZ の通過流量の比である。以下に算定式を示す。

$$\text{EDZ 通過流量比率} = \frac{\text{EDZ 通過流量}}{\text{透水係数が } 1.0 \times 10^{-3} \text{ の時の緩衝材, EDZ の合計通過流量}}$$

図 5.1.3-46～図 5.1.3-48 に処分孔平均での各領域の通過流量の比率を示す。緩衝材の透水係数が 1.0×10^{-3} m/sec の時はほぼすべての湧水が緩衝材を通過して流出している。しかし、緩衝材の透水係数が小さくなるに従い緩衝材通過流量の比率が減少し周辺の動水勾配が変化することで、EDZ 通過流量、および周辺岩盤に向かってながれる流量の比率が増加していく。最終的に緩衝材の透水係数が 1.0×10^{-12} m/sec まで低下した場合には、緩衝材通過流量の比率は 1 割以下まで低下し、EDZ 通過流量、および周辺岩盤に向かってながれる流量の比率は合わせて 9 割程度まで増加した。特に、緩衝材の透水係数が EDZ の設定透水係数 (1.0×10^{-6} m/sec) を下回った場合、EDZ 通過流量の比率は全体の約 7 割を占める。以上より、処分孔に緩衝材を定置し処分孔の透水係数が低下することで、処分孔に流出していた湧水は、主に EDZ に向かって流れることが考えられる。

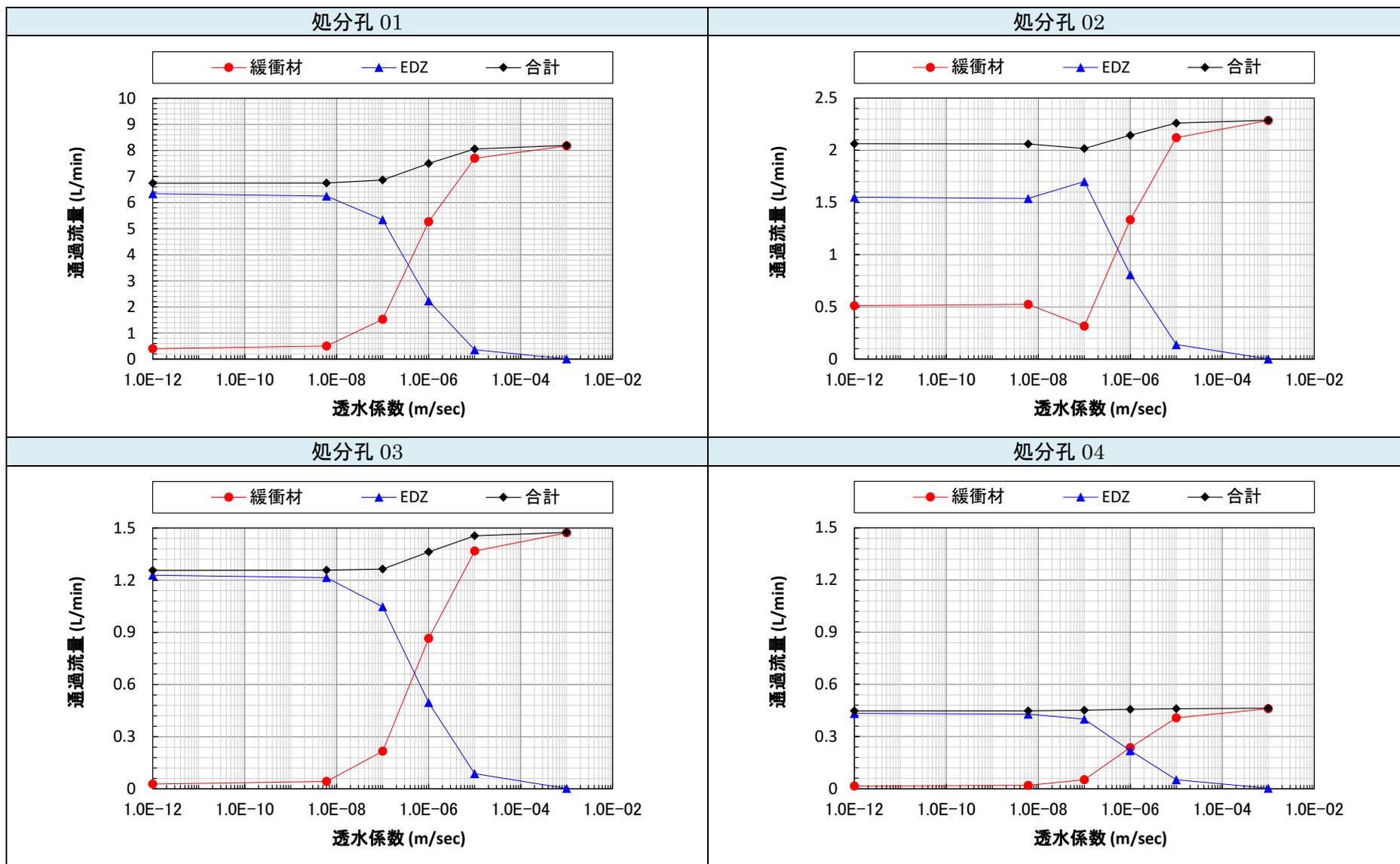


図 5.1.3-43 EDZ を考慮した場合の境界部および EDZ 部通過流量の関係 (処分孔平均) (1)

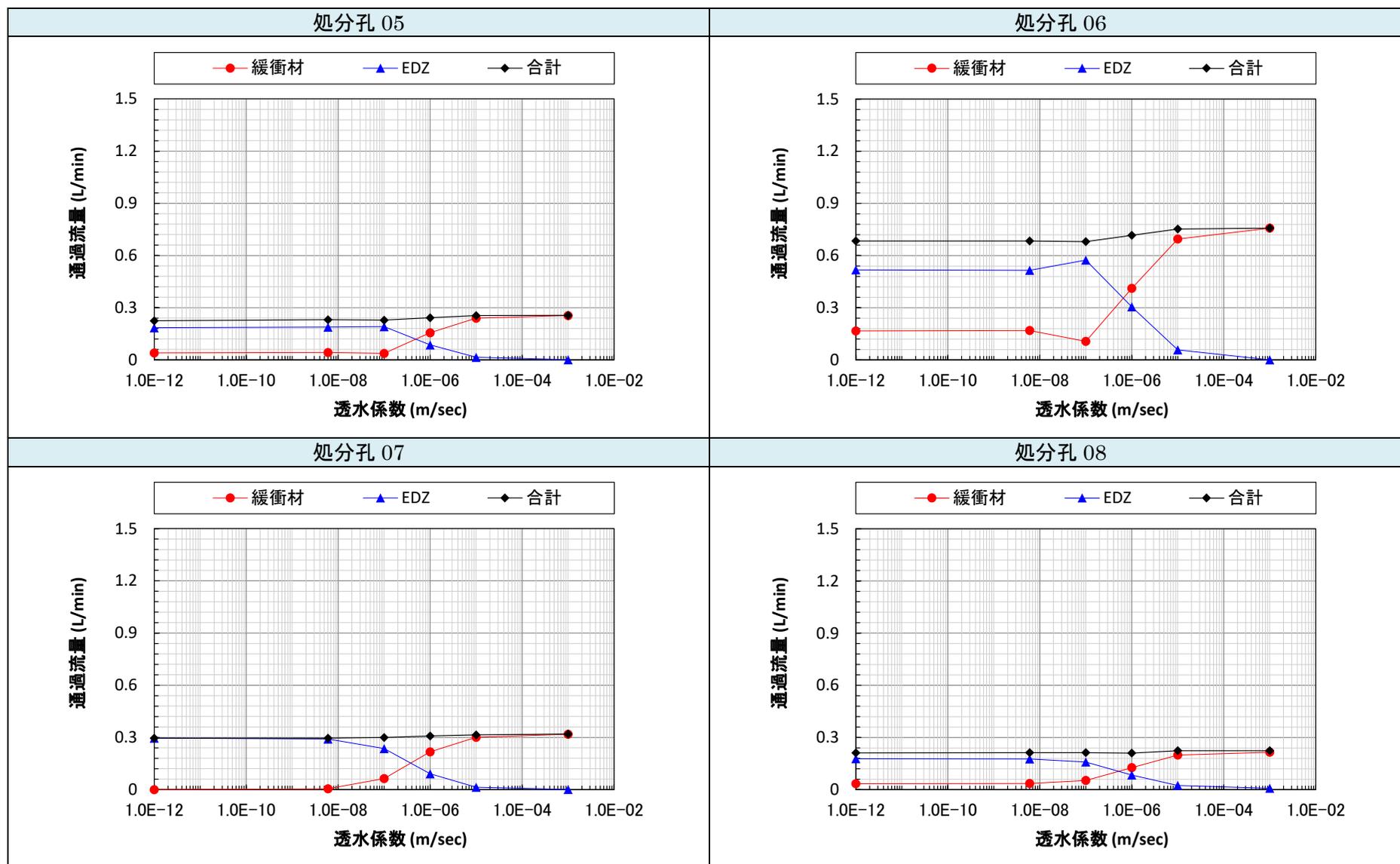


図 5.1.3-44 EDZ を考慮した場合の境界部および EDZ 部通過流量の関係 (処分孔平均) (2)

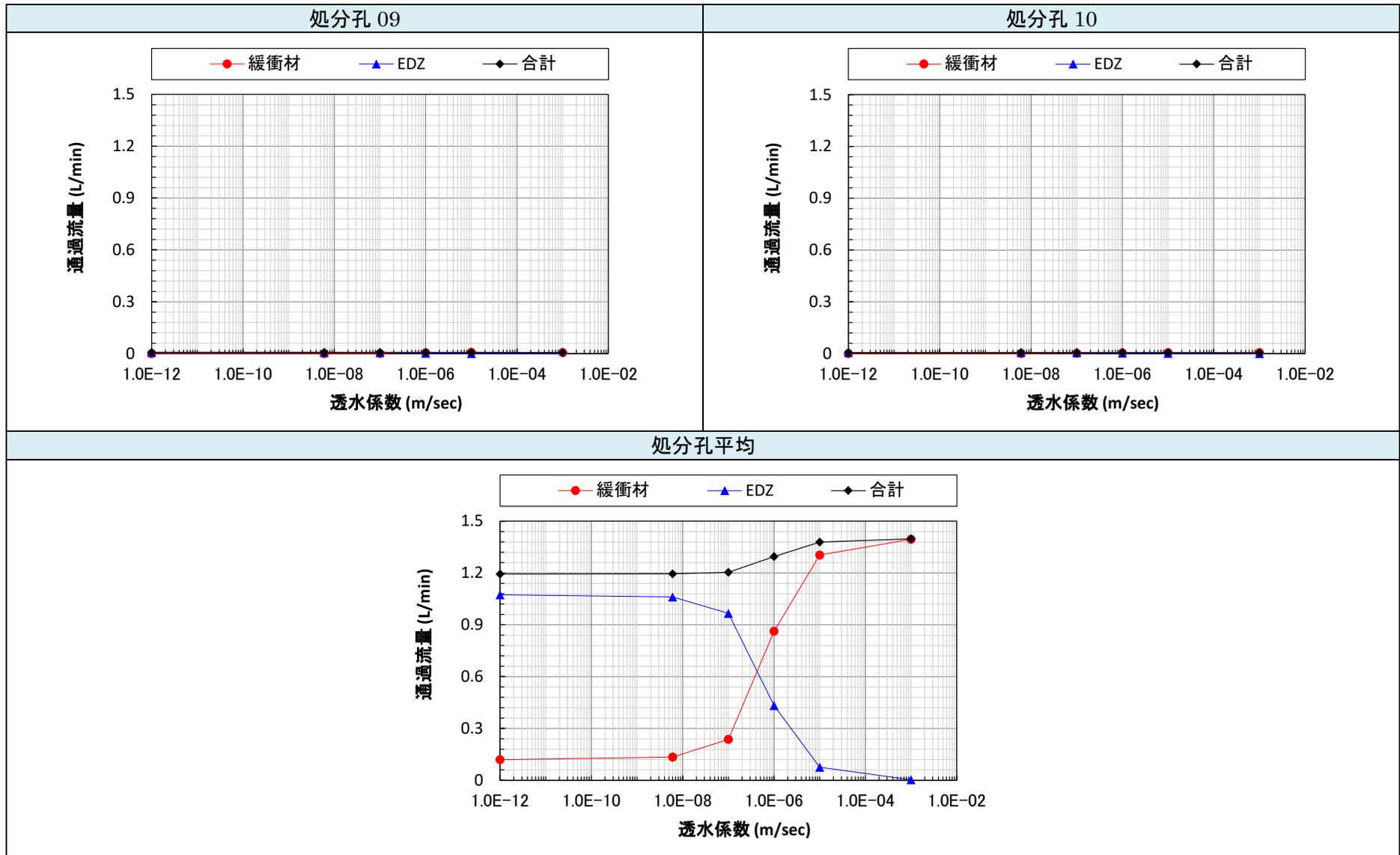


図 5.1.3-45 EDZ を考慮した場合の境界部および EDZ 部通過流量の関係 (処分孔平均) (3)

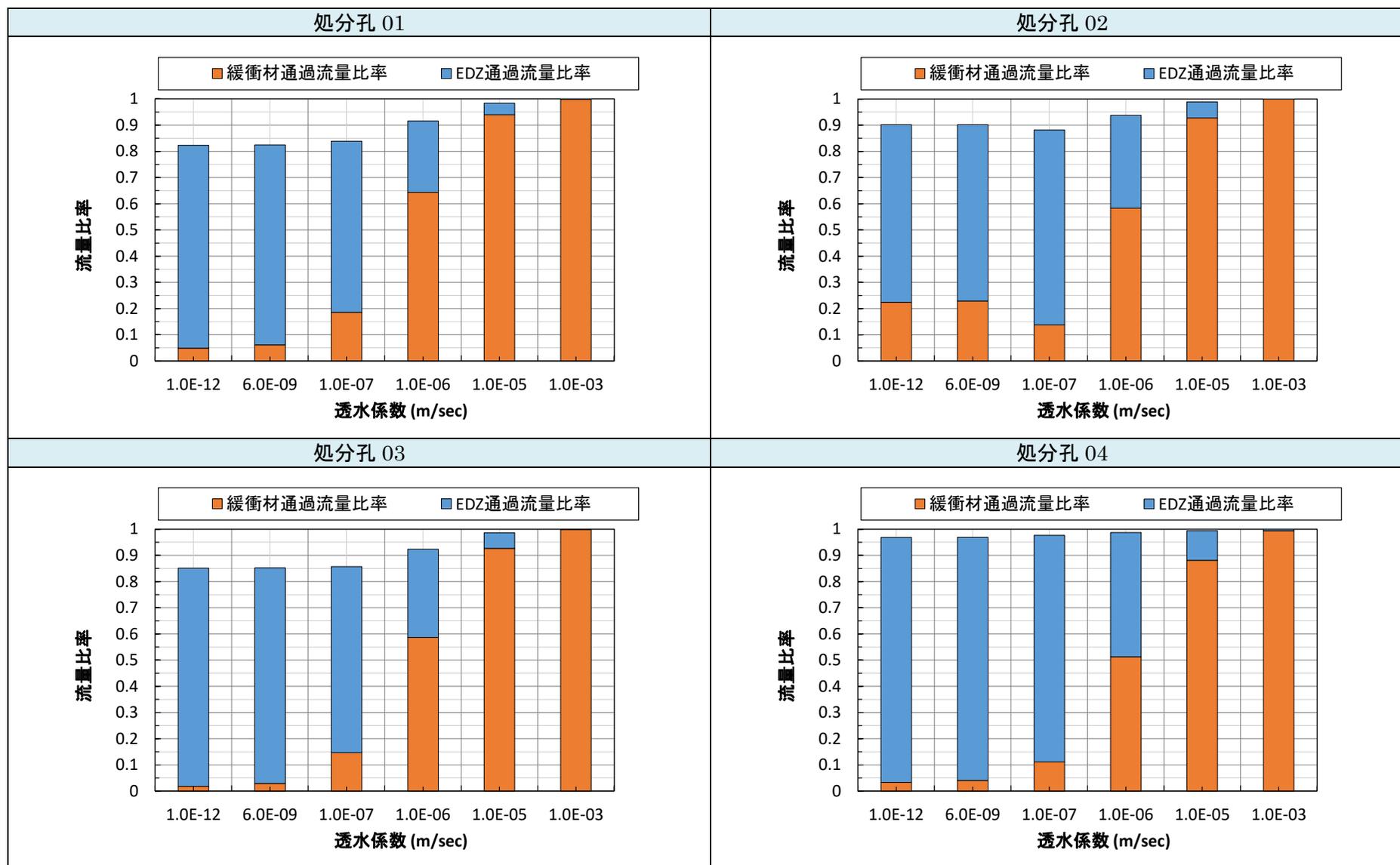


図 5.1.3-46 EDZ を考慮した場合の、各領域の通過流量の比率 (処分孔平均) (1)

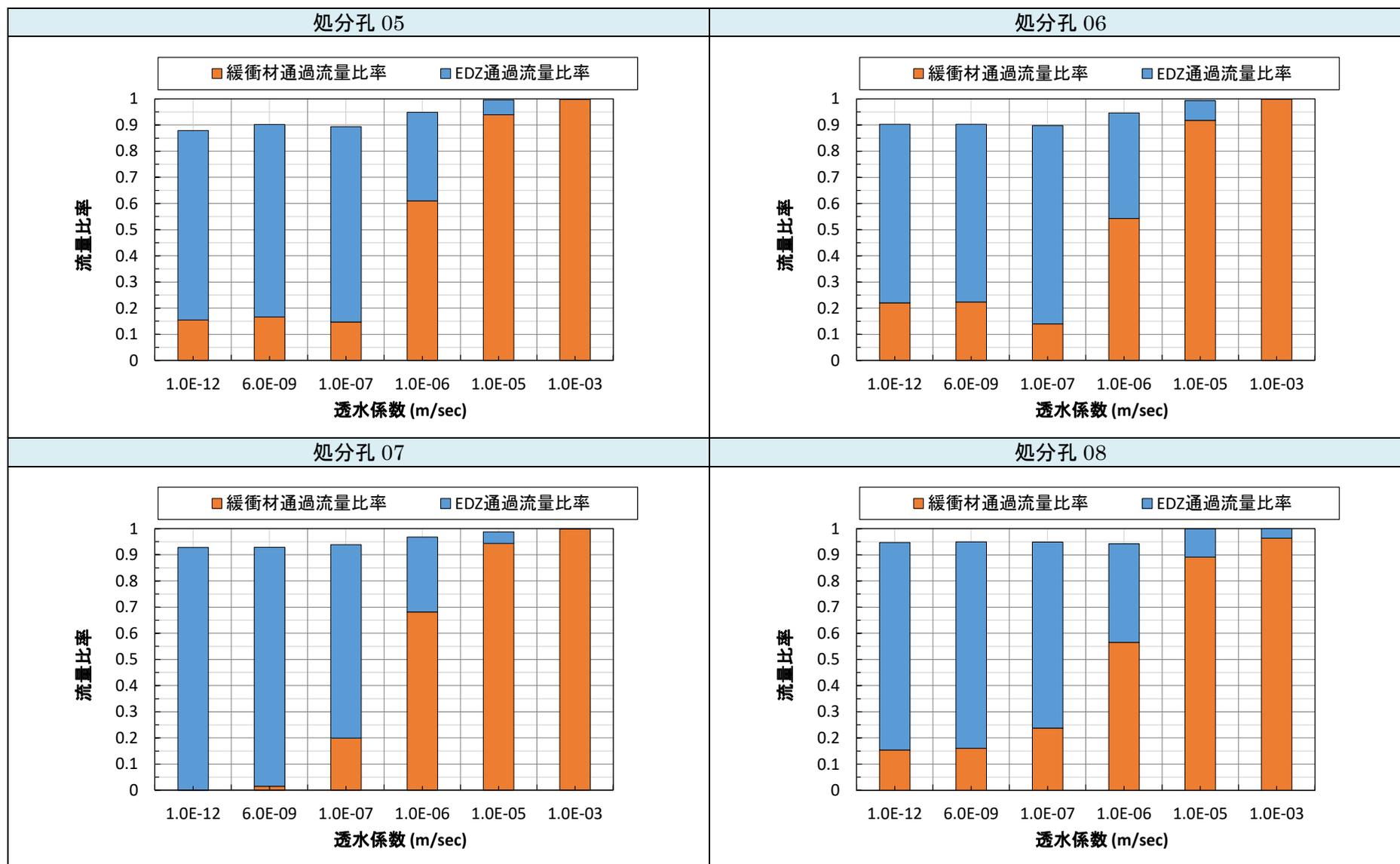


図 5.1.3-47 EDZ を考慮した場合の、各領域の通過流量の比率 (処分孔平均) (2)

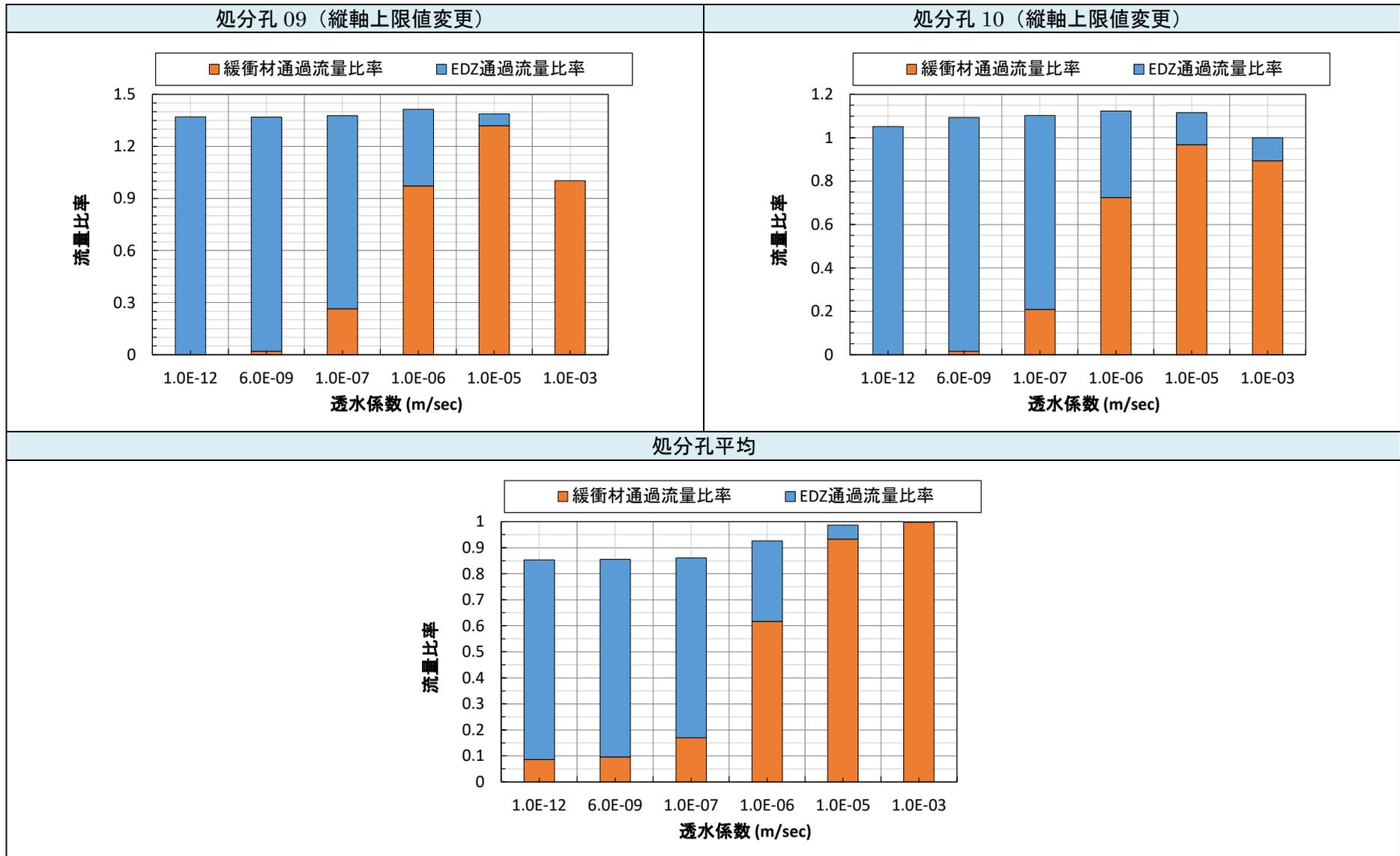


図 5.1.3-48 EDZ を考慮した場合の、各領域の通過流量の比率 (処分孔平均) (3)

3) EDZ の考慮の有無による比較

本検討では、EDZ 部のパイプの透水係数を岩盤相当にすることで岩盤を模擬（EDZ を考慮しない場合）し、EDZ に相当する透水係数を設定することで、EDZ を模擬（EDZ を考慮する場合）している。図 5.1.3-49～図 5.1.3-59 に、各モデルにおける緩衝材通過流量、EDZ 通過流量（EDZ を考慮しないモデルでは処分孔直近の通過流量）および緩衝材の全水頭（全節点の平均値）を示す。

処分孔 10 孔の平均の値の傾向（図 5.1.3-59）を確認する。緩衝材通過流量の透水係数に対する変化傾向は EDZ の有無に関わらず概ね同じであるが、EDZ を考慮したモデルの方が EDZ を考慮しないモデルに比べて、通過流量が小さい傾向である。EDZ 通過流量についても透水係数に対する変化傾向は同様であるが、EDZ を考慮しないモデルに比べて、EDZ を考慮したモデルの方が通過流量の変化が大きい。緩衝材の全水頭の透水係数に対する変化傾向は EDZ 通過流量と類似した傾向を示す。ただし、EDZ を考慮したモデルの方が、EDZ を考慮しないモデルに比べて全水頭が小さい傾向である。また、透水係数が小さい 6.0×10^{-9} m/sec～ 1.0×10^{-12} m/sec の間では、EDZ を考慮したモデルの変化量は小さいのに対し、EDZ の通過流量は増加傾向を示す。ただし、処分孔 07 では、緩衝材の透水係数が大きい時に、緩衝材通過流量の大小関係が逆転しており、処分孔 08 では、透水係数が小さい条件で逆転しているなど、一部において平均的な傾向とは異なる処分孔も見られた。

EDZ/健岩部境界のパイプに対して、岩盤相当の透水係数（ 6.0×10^{-9} m/sec）を設定する、EDZ を考慮しないモデルは、グラウトなどにより EDZ の透水係数を岩盤相当まで低減させた際の状況と考えることが出来る。緩衝材の定置後に自己膨潤などにより透水係数が減少した場合、緩衝材の全水頭が大きくなるとともに、緩衝材の通過流量が小さくなる。この時、周辺に EDZ がある場合には、緩衝材を通過しない分の湧水が透水性の高い EDZ に向かって流れるようになる。一方で、グラウトを実施するなどして EDZ の透水性を小さくすると、処分孔直近の領域に向かって流れる量が少なくなる。そのため、EDZ を考慮していないモデルに比べて、EDZ を考慮したモデルの方が緩衝材の通過流量が小さくなり、EDZ 通過流量は大きくなると考えられる。また、EDZ を考慮していないモデルでは、緩衝材周辺に流れやすい領域が無いため、EDZ を考慮したモデルに比べて全水頭が大きくなる。また、緩衝材の透水係数が小さくなるに従って、周辺領域へ向かう湧水量が増加し、全水頭も大きくなると考えられる。

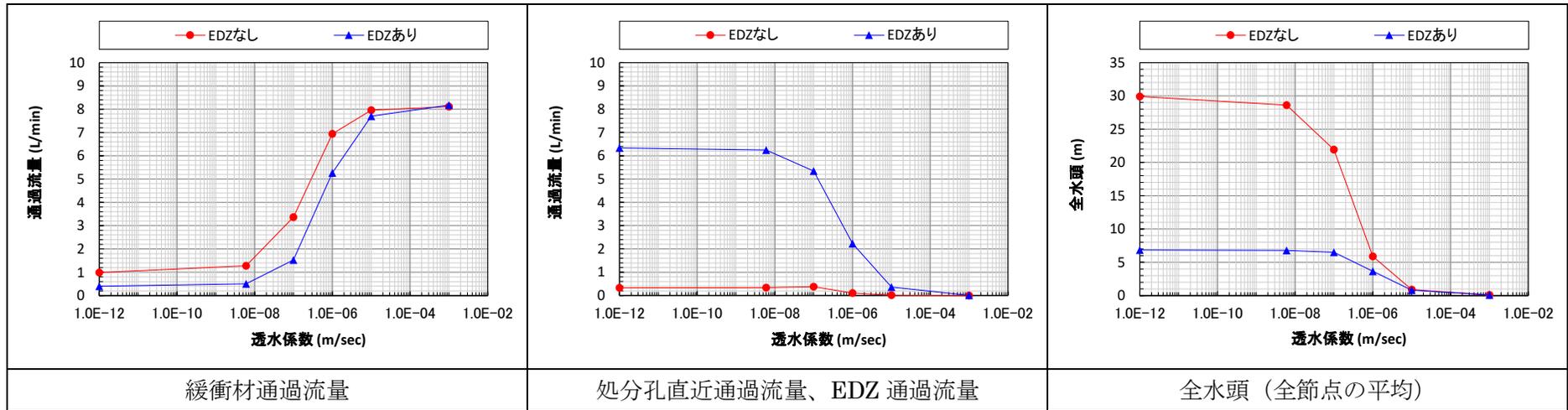


図 5.1.3-49 EDZの有無による通過流量および全水頭の比較 (処分孔 01)

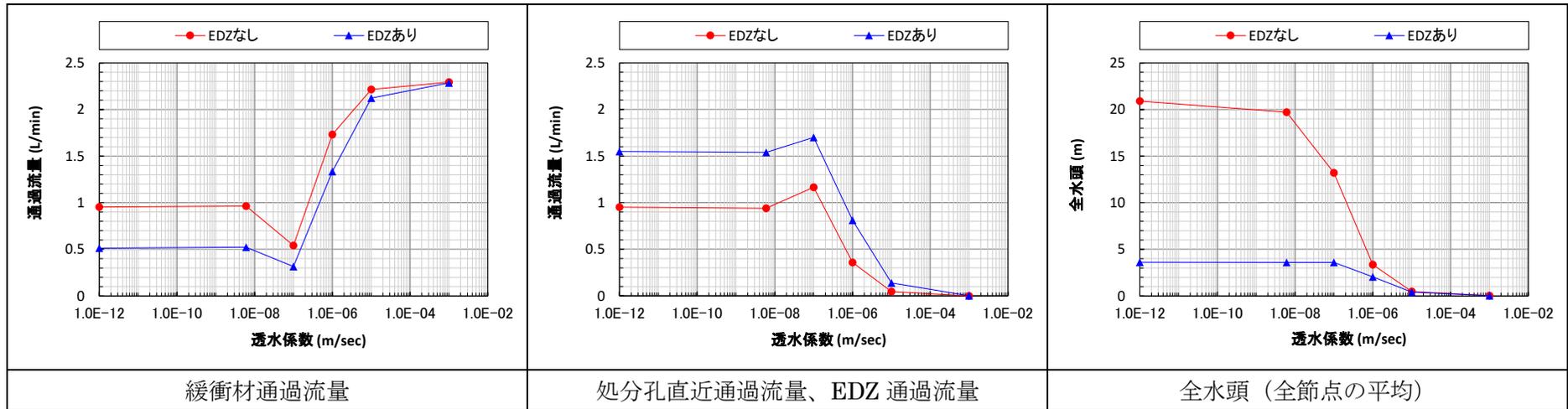


図 5.1.3-50 モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔 02)

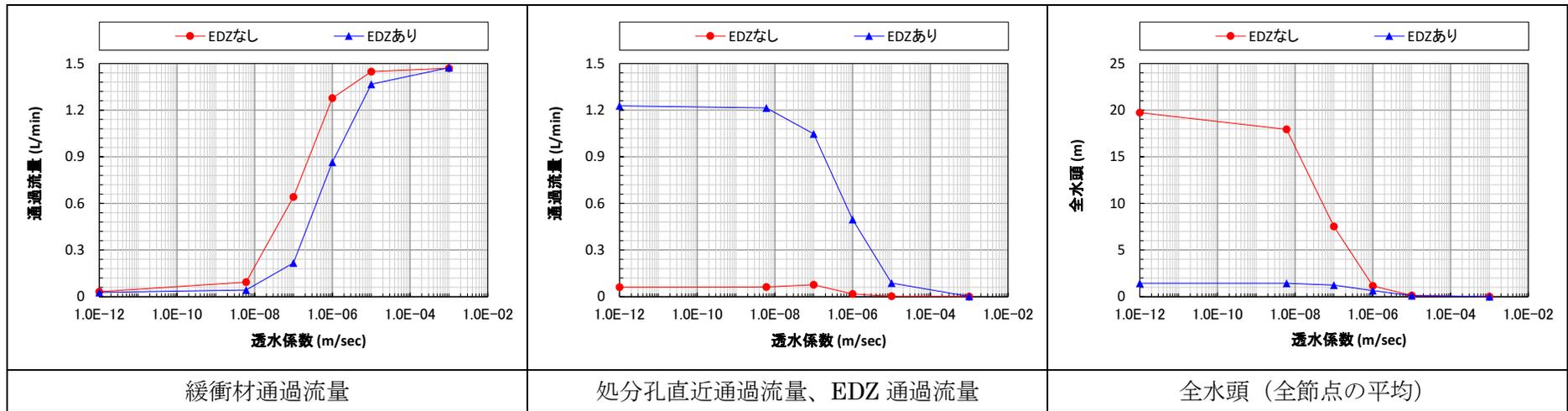


図 5.1.3-51 モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔 03)

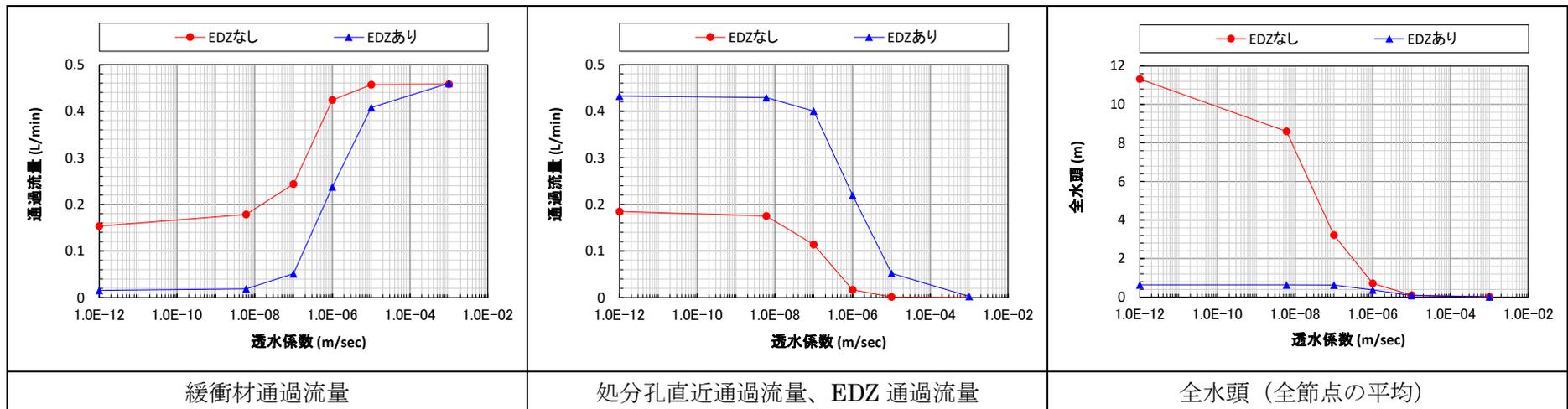


図 5.1.3-52 モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔 04)

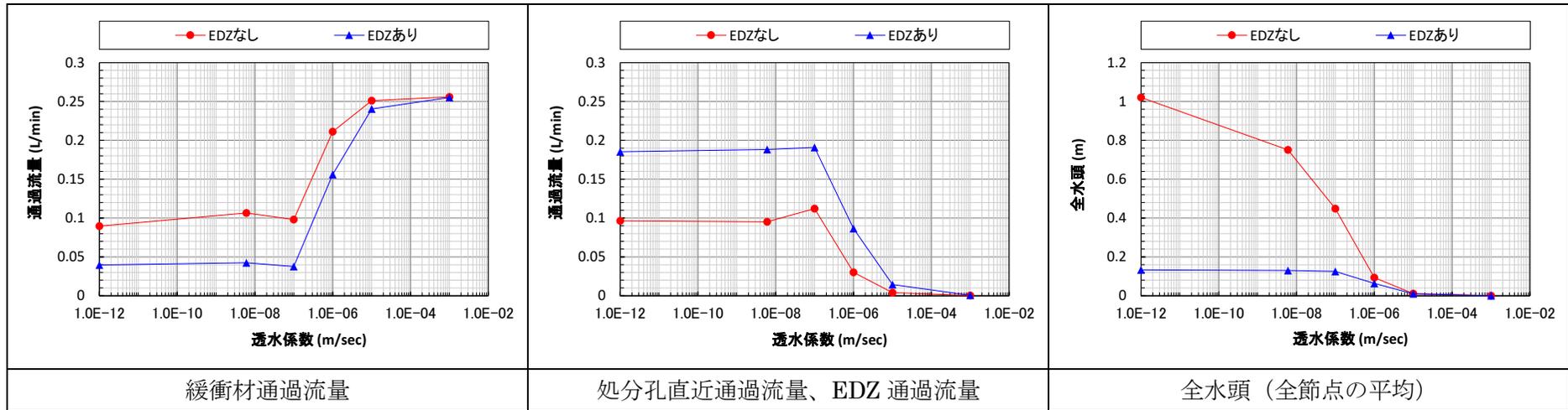


図 5.1.3-53 モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔 05)

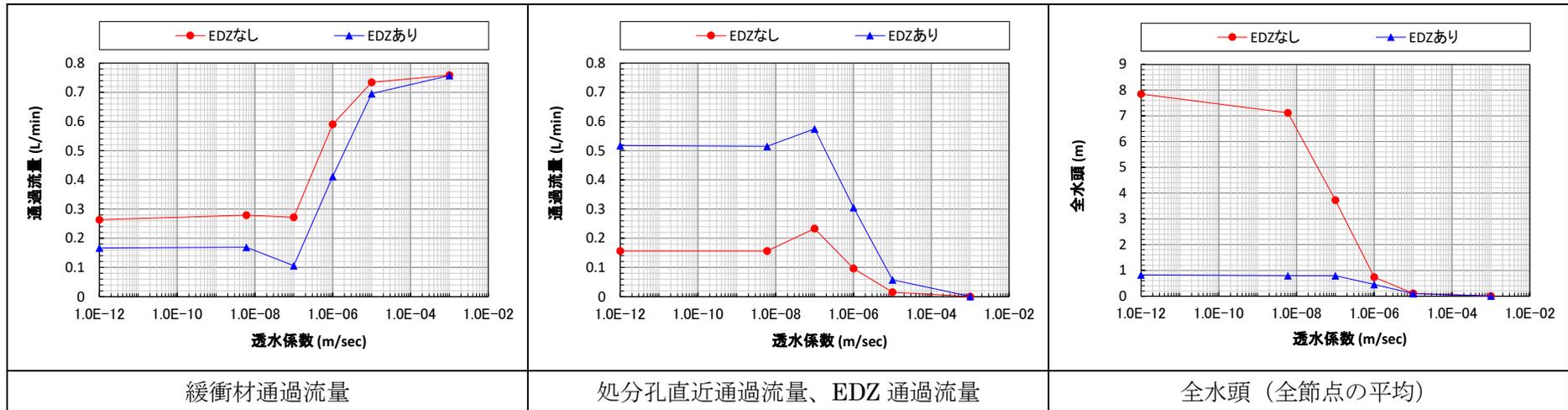


図 5.1.3-54 モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔 06)

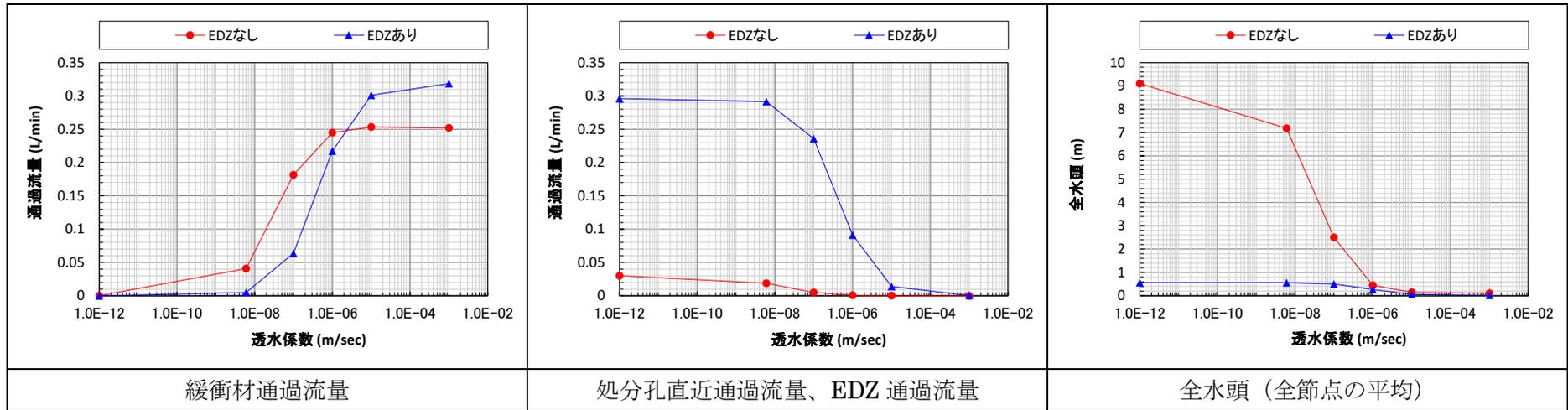


図 5.1.3-55 モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔 07)

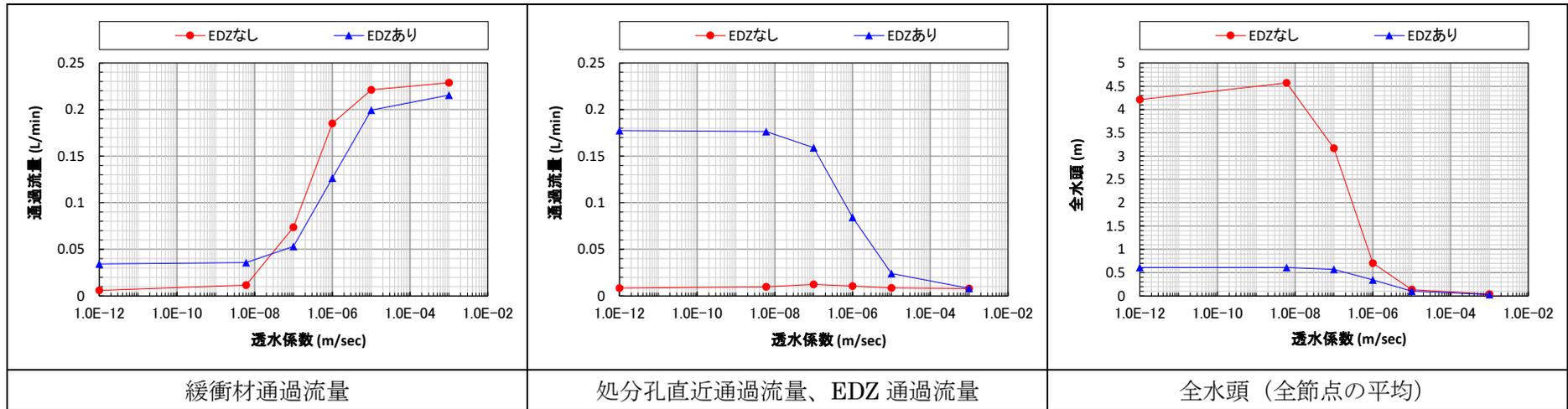


図 5.1.3-56 モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔 08)

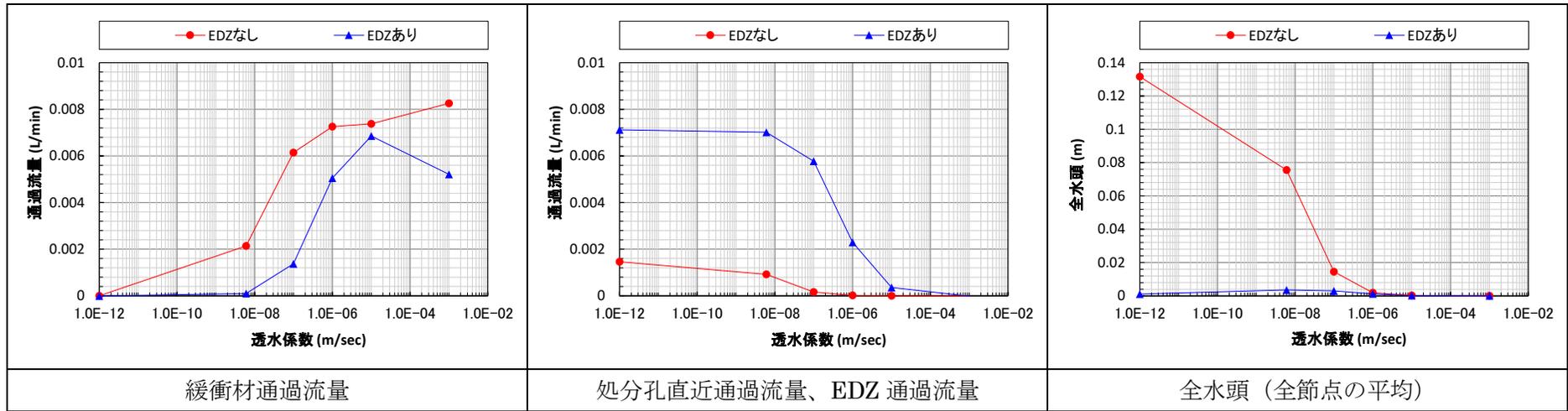


図 5.1.3-57 モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔 09)

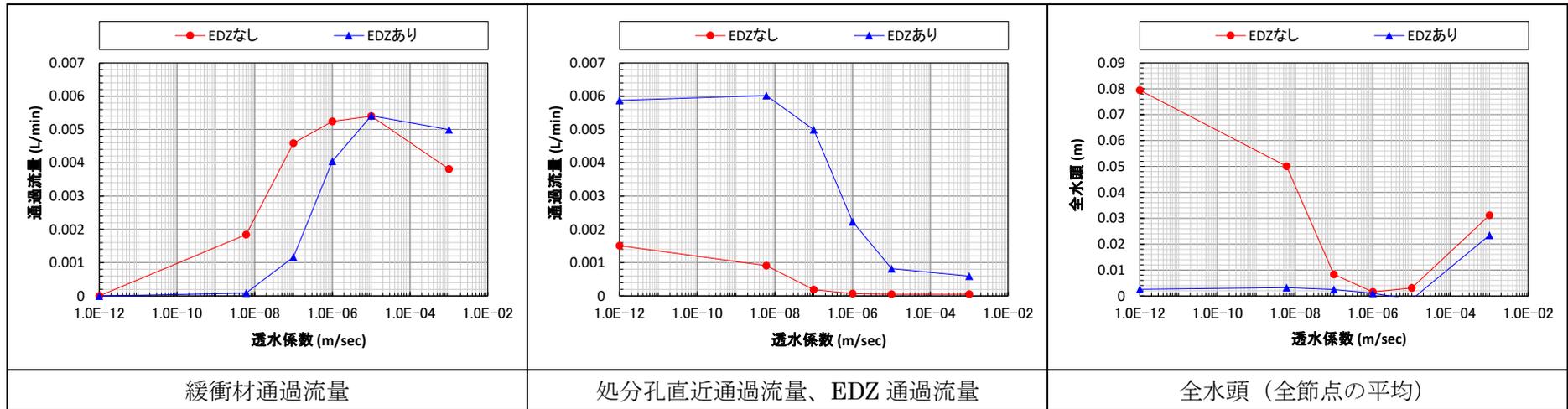


図 5.1.3-58 モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔 10)

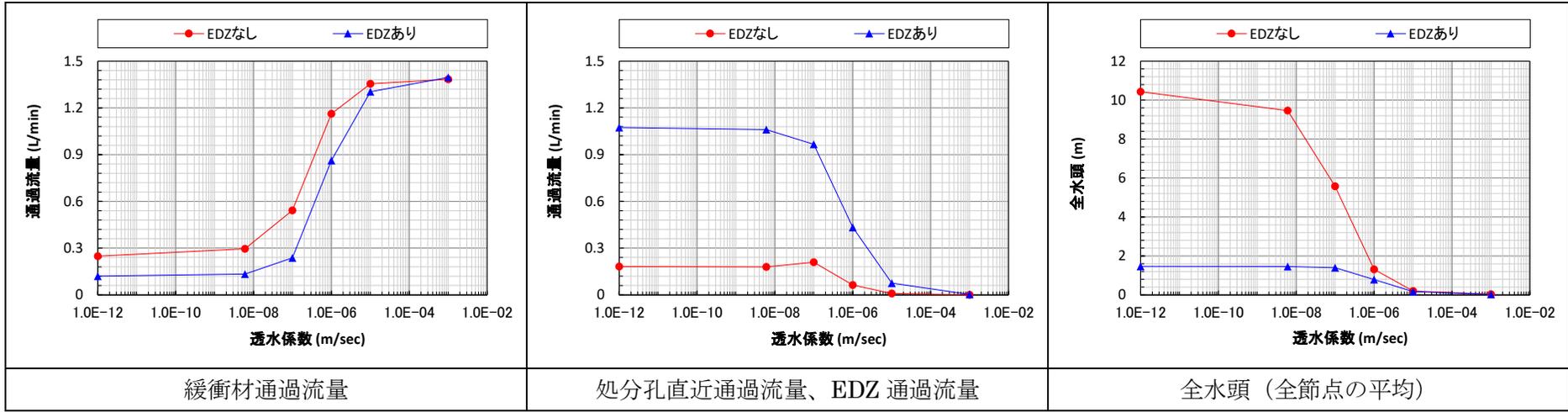


図 5.1.3-59 モデルごとの通過流量および全水頭 (処分孔平均)

4) 通過流量および地下水圧（全水頭）に関する考察

1)~2)cにおいて、それぞれのケースにおける緩衝材およびEDZ通過流量、緩衝材の地下水圧（全水頭）を算定したが、10個の処分孔それぞれに異なる値を示すことが確認された。以下にそれらについて考察を行う。

a 処分孔周辺の通過流量

処分孔08に着目する。平均的には処分孔のEDZ通過流量、処分孔通過流量は、図5.1.3-60に示す通り透水係数が小さくなるにつれて大きくなる傾向である。一方で、処分孔08のEDZを考慮しないモデルでは、透水係数の変化に対してほとんど応答が見られない。また、緩衝材の透水係数が最も大きい 1.0×10^{-3} m/secの条件では、EDZを考慮しないモデルの流量が比較的大きく、EDZを考慮したモデルとほぼ同等の値である。次にこの要因について考察する。図5.1.3-61に処分孔08周辺の割れ目分布図を示す。これを見ると、処分孔08の下部直近に割れ目が分布していることが確認できる。EDZを考慮していないモデルでは、この割れ目から直接流入する湧水量が大きかったため、全体の通過流量としてほとんど影響を受けなかったと考えられる。一方、EDZを考慮したモデルでは処分孔直近に透水性の高いEDZを設けているため、当該割れ目からの流入量よりも透水係数の低下により流動経路が変化することで増加した流量の影響が大きかったため、流量の増加が生じ、EDZを考慮していないモデルと同様の湧水量となったと考えられる。

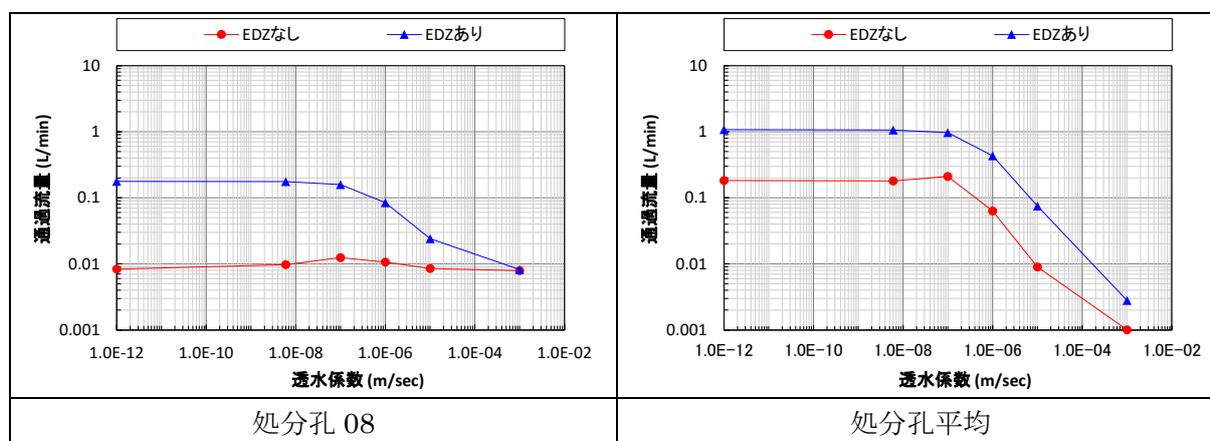


図 5.1.3-60 EDZ ありモデルの EDZ 通過流量と EDZ なしモデルの処分孔直近通過流量（処分孔 08）

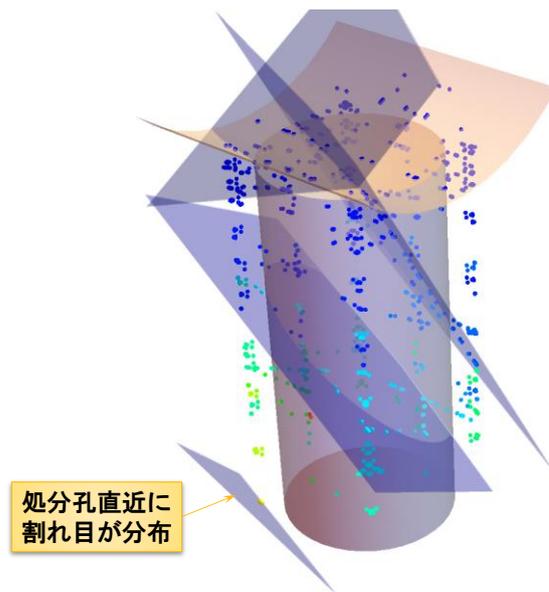


図 5.1.3-61 処分孔 08 周辺の割れ目分布 ($0.01\text{L}/\text{min}$ 以上) および全水頭分布図 (1.0×10^{-12} m/sec)

b 緩衝材の地下水圧（全水頭）に関する考察

全水頭はモデル外側の境界（全水頭 350m）から、大気圧境界に近づくにつれて小さくなることが想定される。処分孔の鉛直方向で考えると、処分孔の上端部の節点が大気圧境界（全水頭 0m）となっているため、深度の大きい処分孔の下部から深度の小さい上部にかけて、全水頭が小さくなることが想定される。そこで、処分孔の全水頭が大気圧境界の節点からの距離（ここでは深度）に依存しているかを確認する。EDZ を考慮しないモデルにおける、透水係数が 1.0×10^{-12} m/sec の条件での深度と節点の全水頭の関係を図 5.1.3-62～図 5.1.3-63 に示す。概ね処分孔の下部ほど全水頭が大きく、大気圧境界の節点が位置する処分孔上部ほど小さい傾向が確認できる。しかし、処分孔 02、処分孔 03、処分孔 04 のようにある深度において急激に全水頭が変化している処分孔も確認される。このように、全水頭が大気圧境界からの距離に単純に依存していないことが分かった。

次に、上記の要因について考察する。図 5.1.3-64 に処分孔 01～処分孔 04 に交差する $0.01\text{L}/\text{min}$ 以上の割れ目と緩衝材の全水頭分布を示す。処分孔 01 の下部から処分孔 04 の上部にかけて大きな割れ目が横断しており、全水頭が変化している部分と割れ目交差深度が概ね一致していることが確認できる。また、処分孔 03 について抜粋した全水頭分布図と、パイプ流量分布図を図 5.1.3-65 に示す。全水頭は上記の横断割れ目を境に大きく変化しており、割れ目交差位置下部では全水頭が大きくなっていることが見て取れる。また、ベクトル図を確認すると、割れ目位置を境に流量が変化していることが認められ、割れ目交差以深に位置する一部のパイプでは、処分孔の下部方向に流れていることが確認された。このように透水性の大きな割れ目が交差し、そこから湧水が供給されることで、割れ目の交差位置以深において全水頭が大きくなったと考えられる。また、処分孔 07 では、深度 43.5m 付近において全水頭が急激に大きくなっている節点が認められる。処分孔 07 周辺の割れ目状況（図 5.1.3-66）を確認すると、ほぼ同位置において割れ目が交差して

いることが確認できる。

処分孔 09 と処分孔 10 では、全水頭のデータが処分孔下部のある深度から欠損している。図 5.1.3-67 に示す通り、処分孔 09 と処分孔 10 には、0.01L/min 以上の割れ目が交差していないことがわかる。水みちとなるパイプの節点がある深度以深では交差しなかったことで、データが得られなかったと考えられる。

以上から、緩衝材の全水頭は割れ目の分布に大きく依存することが示された。そのため、割れ目の卓越する岩盤に緩衝材を定置した場合には、割れ目の分布により緩衝材表面の全水頭は単純に大気圧境界の節点からの距離に依存せず、割れ目交差箇所で局所的に全水頭が高くなるような地下水圧分布となることが考えられる。

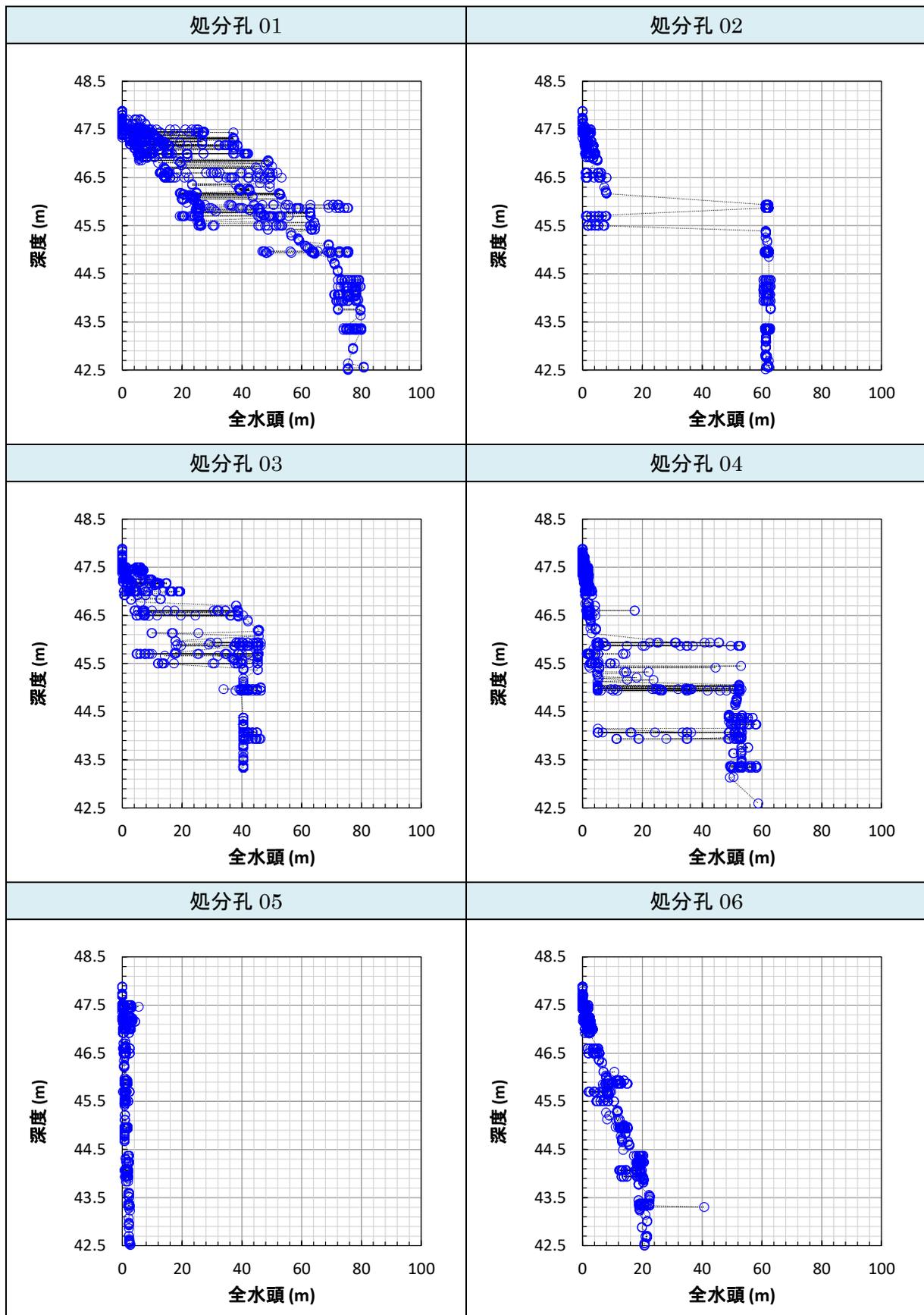


図 5.1.3-62 EDZ を考慮しない条件における深度と全水頭の関係
(透水係数 1.0×10^{-12} m/sec) (1)

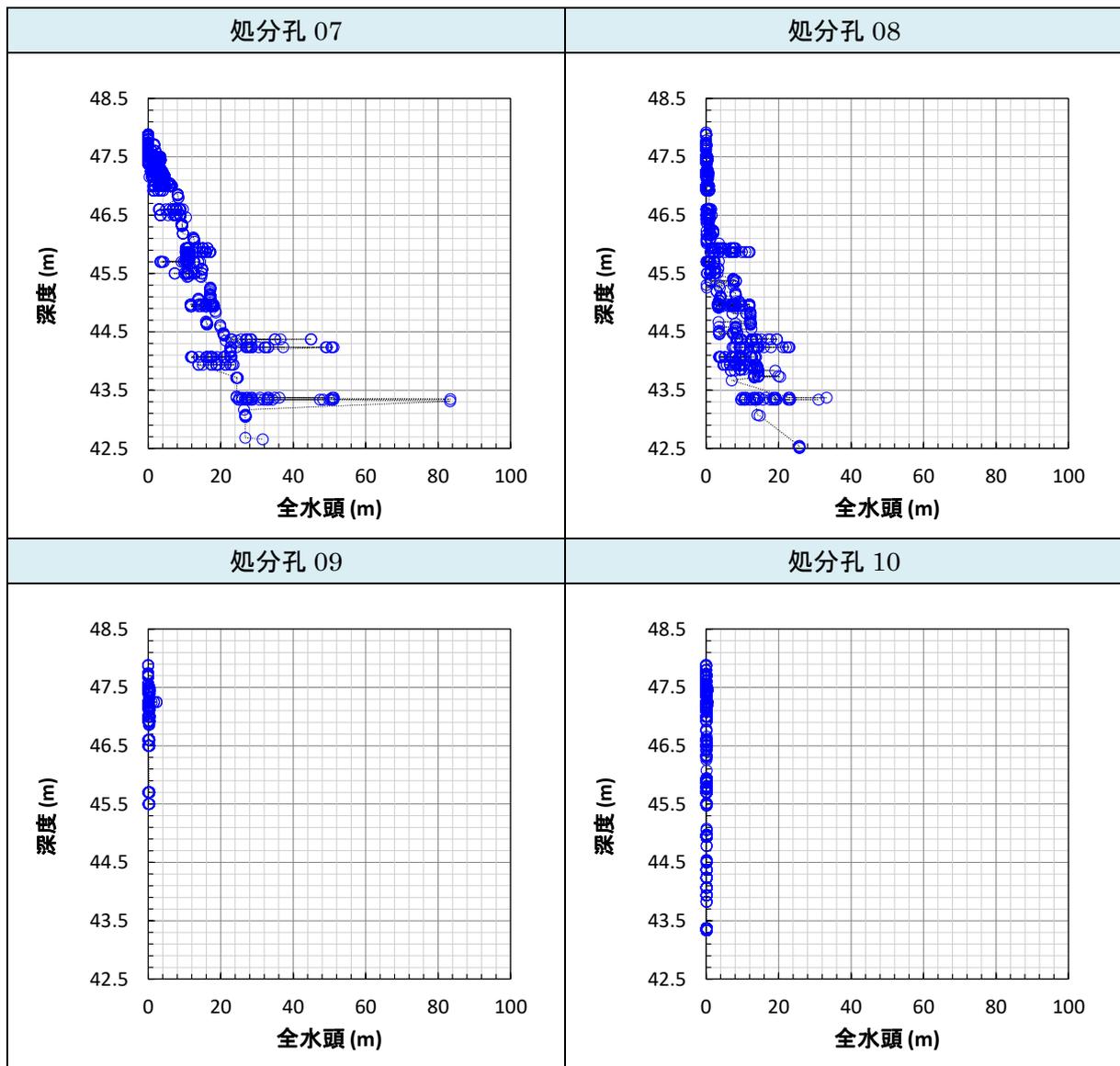


図 5.1.3-63 EDZ を考慮しない条件における深度と全水頭の関係
(透水係数 1.0×10^{-12} m/sec) (2)

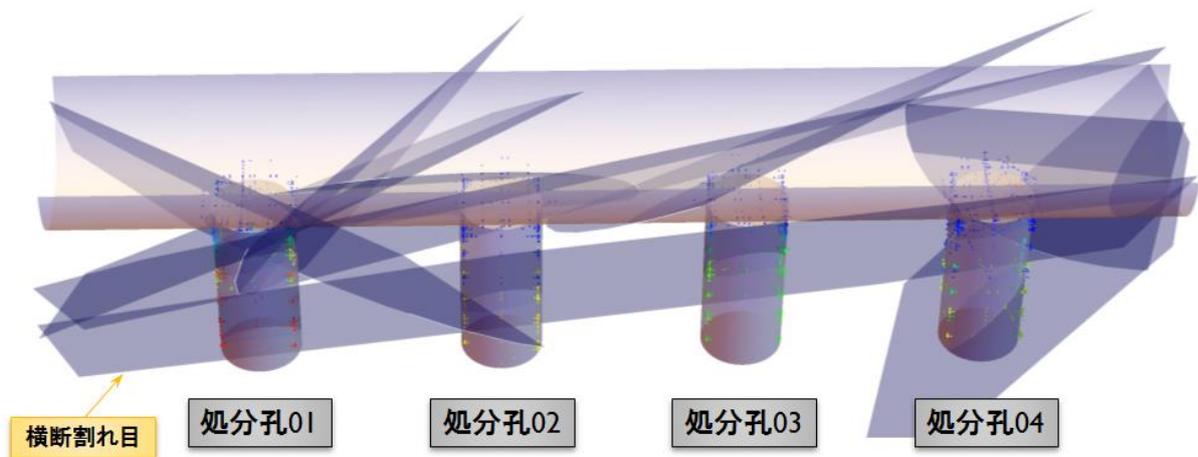


図 5.1.3-64 処分孔 01～処分孔 04 に交差する割れ目分布 (0.01L/min 以上)
と緩衝材の全水頭分布図 (1.0×10^{-12} m/sec)

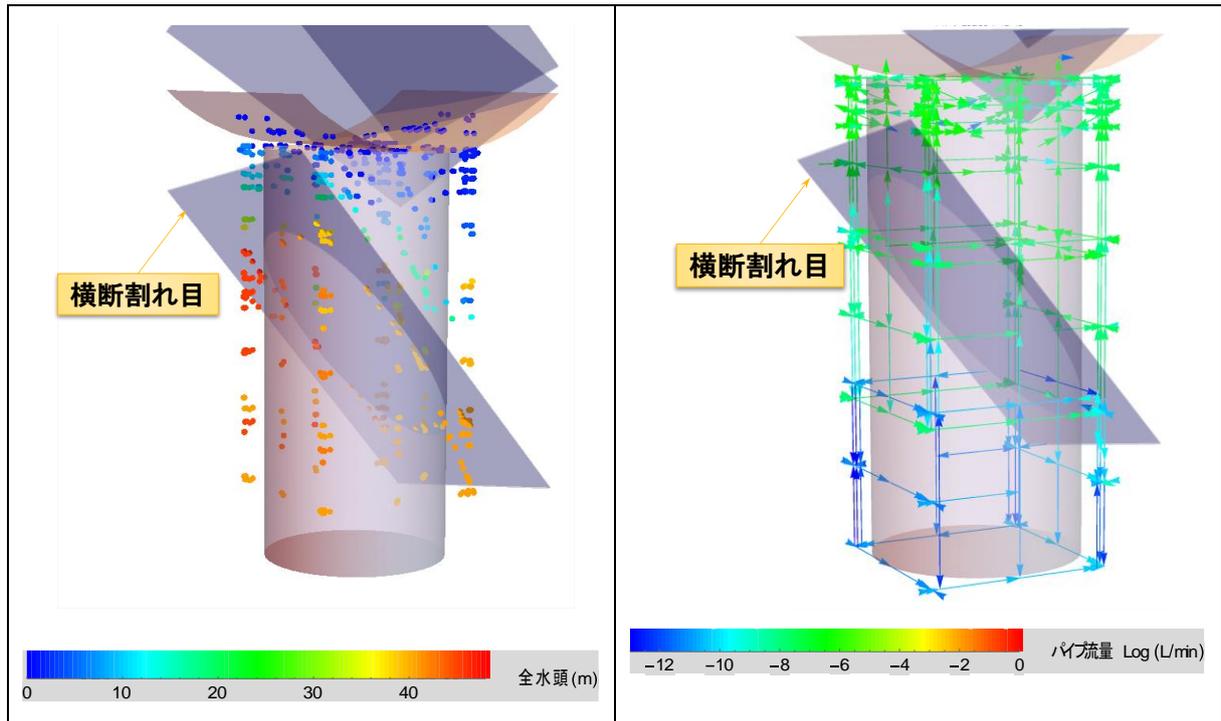


図 5.1.3-65 処分孔 03 周辺の割れ目分布 (0.01L/min 以上) および全水頭分布図およびパイプ流量分布図 (1.0×10^{-12} m/sec)

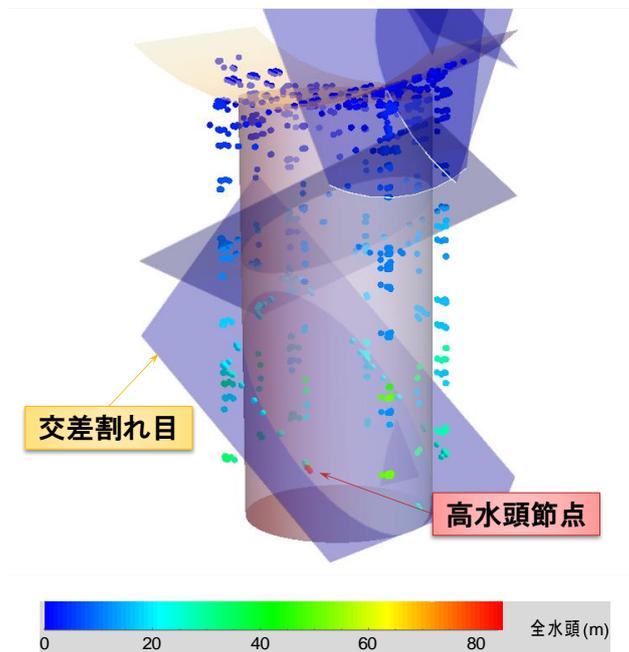


図 5.1.3-66 処分孔 07 周辺の割れ目分布 (0.01L/min 以上) および全水頭分布図 (1.0×10^{-12} m/sec)

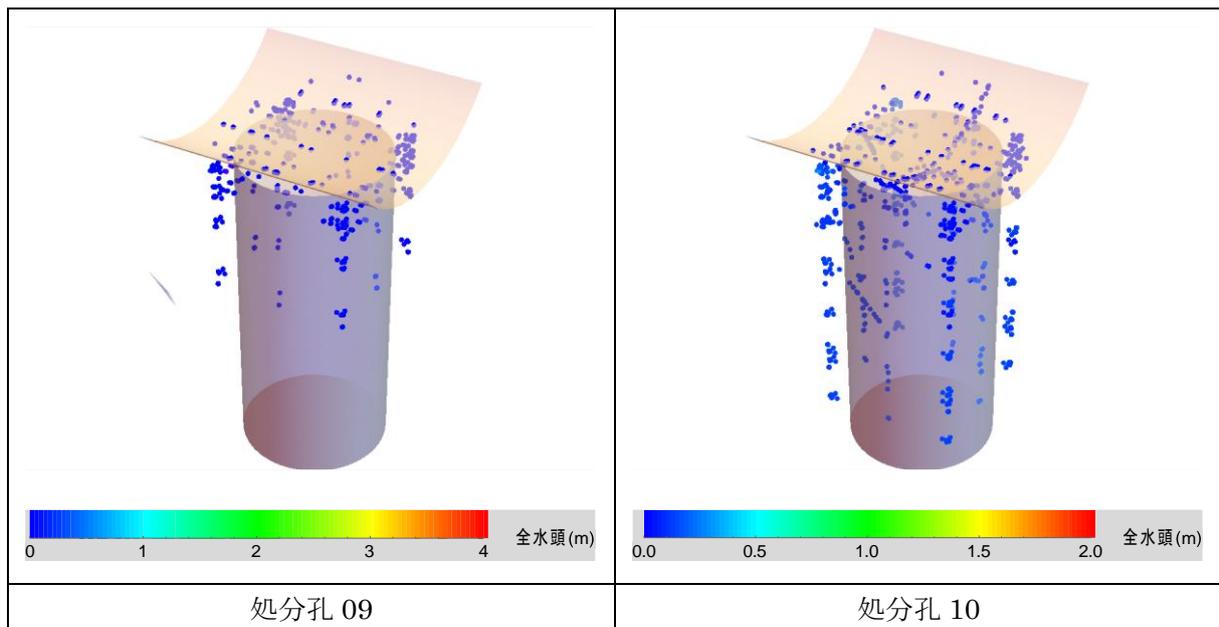


図 5.1.3-67 処分孔 09、処分孔 10 に交差する 0.01L/min 以上の割れ目分布
および全水頭分布図 (1.0×10^{-12} m/sec)

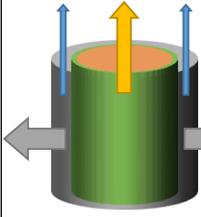
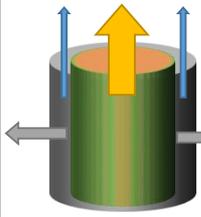
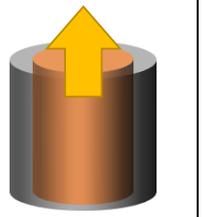
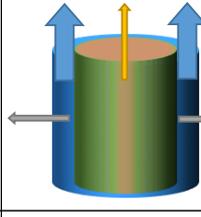
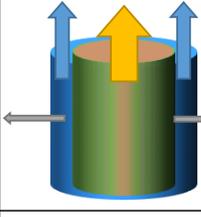
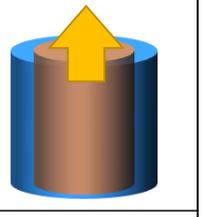
(5) まとめ

ここでは、平成 28 年度に作成した複数坑道モデルを用いて、処分孔および EDZ のモデル化と、緩衝材の自己膨潤によって生じる緩衝材の低密度の比較的高い透水性を模擬した浸透流解析を実施した。処分孔および EDZ のモデル化では、緩衝材／岩盤境界、EDZ／健岩部境界にそれぞれ処分孔、EDZ の面積と等価な矩形のモデルとなるように、割れ目およびパイプを発生させた。

次に、EDZ が存在する場合、存在しない場合それぞれの状況での緩衝材定置後の処分孔周辺の湧水挙動を再現するため、EDZ 部の透水係数、緩衝材の透水係数を設定し、浸透流解析を実施し、緩衝材通過流量、EDZ 通過流量、処分孔直近の通過流量、緩衝材の地下水圧（全水頭）を算定した。

その結果、EDZ 部のパイプに岩盤相当の透水係数を設定した場合では、処分孔周辺の地下水流動においては、緩衝材の透水係数が大きい時は緩衝材中の流れが支配的であるが、透水係数が小さくなるにつれて緩衝材通過流量は減少し、緩衝材の全水頭が上昇するとともに周辺の動水勾配が変化することで湧水は処分孔周辺の岩盤に向かって流れることが示唆された。EDZ 部のパイプに EDZ の透水係数を設定した場合では、緩衝材の透水係数が大きい時は、緩衝材中の通過流量が多く、透水係数が小さい時は EDZ 中の通過流量が多い結果となった。図 5.1.3-68 に各条件における平均的な湧水の状況を示す。

全体としては上記の様な傾向を示すものの、緩衝材の通過流量や全水頭は、割れ目の分布に応じてばらつきを示すことが確認された。処分孔によっては、透水係数の変化によって通過流量が変わらない場合や割れ目交差位置で全水頭が変化する場合が認められるなど、処分孔周辺の地下水流動に割れ分布が影響を及ぼすことが示唆された。

EDZ部透水係数 (m/sec)	緩衝材透水係数 (m/sec)		
	$6.0 \times 10^{-9} \sim 1.0 \times 10^{-12}$	$1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-5}$
EDZなし 6.0×10^{-9}			
緩衝材通過流量 (L/min)	0.25~0.30	0.54~1.16	1.35~1.38
処分孔直近通過流量 (L/min)	0.18~0.18	0.06~0.21	0.00~0.01
全水頭 (m)	9.46~10.43	1.31~5.57	0.04~0.20
EDZあり 1.0×10^{-6}			
緩衝材通過流量 (L/min)	0.12~0.13	0.24~0.86	1.30~1.40
EDZ通過流量 (L/min)	1.06~1.07	0.43~0.97	0.00~0.08
全水頭 (m)	1.46~1.47	0.79~1.40	0.02~0.17

※数値は処分孔平均値を使用

図 5.1.3-68 各条件における処分孔周辺の湧水挙動 (処分孔平均)

5.1.4 まとめと今後の課題

(1) まとめ

本年度は、昨年度作成した複数の処分坑道を考慮した 3 次元の割れ目ネットワークモデルを用いて、隣接坑道の埋戻しや処分孔へ緩衝材定置を想定したモデル化を行った。初めに、埋戻しの施工順序を想定して (1)隣接坑道の処分孔の緩衝材定置が完了した場合、(2)緩衝材定置後処分坑道が埋戻された場合、それぞれについて浸透流解析を行い、隣接坑道の埋め戻しや処分孔への緩衝材の定置が処分坑道及び処分孔の湧水量へ与える影響についての検討を行った。また、埋戻し前の解析結果との比較を行い、および埋戻しの手順が湧水量の変化に与える影響を評価した。次に、複数の処分坑道を考慮した 3 次元の割れ目ネットワークモデルのうち、最も湧水量の多かった HR08P モデルを基本とし、処分孔周辺に EDZ をモデル化しない場合とした場合で水理モデルを作成した。このモデルを用いて、処分孔に緩衝材が定置された後の EDZ や処分孔を通過する地下水の流量や全水頭分布を算定した。このように緩衝材の膨潤を考慮したモデル化を行うことで、緩衝材定置後の処分孔周辺の地下水挙動の評価を行った。以下に、これらの検討結果から得られた知見をまとめる。

● 処分坑道の埋戻し順序に関する知見

処分坑道を埋め戻すことにより、隣接する処分坑道や処分孔の湧水量へ影響を与えることが分かった。処分孔湧水の変化に着目すると、隣接処分坑道に位置する処分孔の定置では最大でも 0.02L/min の増加だが、隣接する処分坑道の埋戻しを行うと最大で 0.5L/min の増加が確認されたことから、隣接の処分孔の定置は問題ないが隣接する処分坑道の埋戻しは緩衝材の定置に支障をきたす可能性がある。このことから、パネル内の周辺坑道の埋戻しは、緩衝材定置が全て完了した後にすることが望ましいと考えられる。

● 緩衝材の定置に関する知見

EDZ 部のパイプに岩盤相当の透水係数を設定した場合、緩衝材の透水係数が大きい時には処分孔周辺の地下水流動は緩衝材中の流れが支配的であるが、透水係数が小さくなるにつれて、緩衝材の水頭が上昇するとともに緩衝材通過流量は減少し、処分孔周辺の岩盤に向かう流れが増加することが示された。EDZ 部のパイプに EDZ の透水係数を設定した場合、処分孔周辺の地下水流動は、緩衝材の透水係数が大きい時には緩衝材中の流れが支配的であり、透水係数が小さい時には EDZ 中の流れが支配的となった。全体としては上記の様な傾向を示すものの、緩衝材の通過流量や水頭は、割れ目の分布に応じてばらつくことが確認され、処分孔によっては、透水係数の変化に感度が無い場合や割れ目の交差位置を境に水頭が大きく変化する場合などが確認された。

(2) 課題

本研究により、割れ目が地下水流動を規定する岩盤において、施工段階における周辺坑道の状態が処分孔湧水へ与える影響や処分孔周辺の通過流量や地下水圧（全水頭）といった地下水挙動を、割れ目ネットワークモデルである LT-Flow を用いて評価することが可能であることを示した。

一方、処分孔周辺の地下水挙動は緩衝材のパイピングやエロージョンと関係しており、これをモデル化することは処分の安全性に影響を与える現象の予測と対策の検討において重要であると考えられる。今回の検討では、処分孔周辺の通過流量と全水頭の分布の計算を行ったが、個々のパイプの流量の計算も可能であるため、これを詳細に分析することで割れ目系岩盤における処分孔周辺の流れの方向や流量の分布を求めることも可能である。今後の課題としては、パイピングやエロージョンを生じさせる地下水挙動の解明のため、これらの計算結果と室内試験や原位置試験結果と比較を行い、緩衝材と接している処分孔周辺の地下水挙動を再現することが必要である。

また、これまで廃棄体堅置きの処分孔について検討を行ってきたが、横置き PEM 方式の処分概念も NUMO により示されている。この場合、堅置き方式と異なり、緩衝材は PEM 容器に収納されているため滴水や高湿度に対し膨潤することはなく、パイピングやエロージョンも生じないため、緩衝材の施工の観点から湧水への対策の重要性は低いと考えられている。しかし、この方式では PEM 容器と処分坑道の隙間を埋め戻す必要があり、処分坑道への湧水がある場合、緩衝材と同様に隙間埋め戻し材の流出が処分の安全性に影響を与えることが考えられる。このため、隙間埋め戻し材の施工における湧水対策が重要である。坑道周辺へのグラウトや吹付けコンクリートの裏面排水によって湧水を低減する対策が想定されているが、その実証試験は今後の課題とされている。このことから、横置き PEM 方式においても、割れ目が地下水流動を規定する岩盤においては、割れ目ネットワークによる処分坑道周辺の地下水挙動のモデル化による評価が必要と考えられる。

5.2 再冠水時の緩衝材の挙動に関わる力学解析手法の検討

5.2.1 概要

放射性廃棄物の地層処分における人工バリアの品質／健全性評価では、施設の再冠水によるベントナイト緩衝材の力学挙動および状態変化を解析的に予測することが重要な位置づけを占める。力学解析に用いられる力学モデルの表現能力は、ベントナイト緩衝材に対する既往の要素実験等の再現性によって担保される。本研究では、室内試験で得られた実験結果をもとに、ベントナイト緩衝材が再冠水過程を経て不飽和状態から飽和状態に至るまでの力学挙動を記述する構成モデルの高度化を図る。

以下に、圧密特性に関するモデルの高度化について述べる。既往の実験的研究から、飽和状態にあるベントナイト緩衝材の正規圧密曲線は、広範囲の乾燥密度状態では、間隙比と圧密応力の対数の関係について直線性を仮定できないことが分かっている。間隙比と圧密応力の対数の関係において、非直線性を仮定した正規圧密曲線を定式化し、媒介変数の導入により、複雑な数理構造を有さない弾塑性構成モデルを構築する。

さらに、膨潤特性に関するモデルの高度化について述べる。既往の実験的研究から、除荷過程にある飽和ベントナイト緩衝材は、著しい膨潤挙動を示すことが分かっている。また、再載荷過程においては、それまでの除荷経路と異なる経路を辿り、応力とひずみの関係にヒステリシスループを描くことが知られている。これに対して上記のように、載荷に伴う塑性圧縮挙動に特化し

たモデルを構築しているが、除荷に伴う塑性膨張挙動を表現する効果を新たに導入し、モデルの高度化を図る。

5.2.2 圧密特性に関するモデルの高度化

(1) ベントナイト緩衝材の正規圧密曲線

ベントナイト、あるいは異種材料との混合土は、高密度に締め固められた状態で緩衝材として地層処分施設の坑道内に設置され、緩衝材全体として見れば、支保工に体積変化を拘束された状態にあると考えられる。このとき、平均的な乾燥密度が一定であったとしても、どの程度、乾燥密度が不均一に分布するかを予測することが性能評価を行う上で、重要な課題となっている。不均一の度合いは境界条件や初期条件にも左右され、この度合いがどの程度生じるかを定量的に照査しようとしている。度合いが大きければ、乾燥密度の空間分布に差が生まれ、部分的に緩い領域が発生するということになる。この照査において大事なことは、予測解析に用いる構成モデルが広範囲の乾燥密度状態における力学応答の再現性を有しているということである。これがない限り、乾燥密度の不均一性について定量的な考察を深めることは、難しいと思われる。

飽和状態にあるベントナイト緩衝材の正規圧密曲線は、広範囲の乾燥密度状態では、間隙比と圧密応力の対数の関係について直線性を仮定できないことが、圧密試験の結果から分かっている。クニゲル V1 に対して実施された含水比一定条件での排気圧縮試験でも、異なる含水比について得られる飽和点が、飽和状態したクニゲル V1 の正規圧密曲線上に乗ることが実験的に示されている。つまり、広範囲の乾燥密度状態に対して、間隙比と圧密応力の対数の関係における正規圧密曲線の直線性を棄却したモデルの構築は、単に飽和状態における圧密応答をうまく表現することだけでなく、不飽和状態から飽和状態に至ったときの状態曲面を規定するという観点からも意味のある作業である。

間隙比と圧密応力の対数の関係について直線性を仮定できない正規圧密曲線であるが、乾燥密度と圧密圧力の対数の関係で見れば、広範囲の乾燥密度状態でも直線性が成り立つことを小林らは示している。この見方によると、正規圧密曲線は、乾燥密度 ρ_d と圧密応力の対数 $\ln \sigma$ の直線関係として次式で近似される。

$$\frac{\rho_d}{\rho_w} = \lambda_r \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} + \frac{\rho_{d0}}{\rho_w} \quad \text{式 5.2-1}$$

ここで、左辺は無次元化のために水の密度 ρ_w で除されている。係数 λ_r は、 $(\rho_d/\rho_w) - \ln \sigma$ 関係での正規圧密曲線の勾配である。土質力学では通常、 $e - \ln \sigma$ 関係で直線近似された正規圧密線の勾配 λ を圧縮指数と称するが、本報告書では、勾配 λ_r も圧縮指数と呼ぶ。また、応力 σ は「有効応力」である。添え字の 0 は、正規圧密線上にある参照状態での値であることを表す。現段階では、正規圧密線上のある一点と見て差し支えない。正規圧密曲線を乾燥密度で表現した式 5.2-1 を、間隙比 e で表現すると次式のようなになる。

$$\frac{G_s}{1+e} - \lambda_r \ln \sigma = \frac{G_s}{1+e_0} - \lambda_r \ln \sigma_0 \quad \text{式 5.2-2}$$

この式は、間隙比 e と圧密応力の対数 $\ln \sigma$ が反比例の関係にあることを示す。ただし、式 5.2-1 から式 5.2-3 への変換には、次の関係を用いている。

$$G_s \frac{\rho_w}{\rho_d} = 1 + e \Rightarrow G_s \frac{\rho_w}{\rho_{d0}} = 1 + e_0 \quad \text{式 5.2-4}$$

ここで、 $G_s (= \rho_s / \rho_w)$ は土粒子比重である。図 5.2.2-1 に式 5.2-1 と式 5.2-2 の正規圧密曲線を示す。

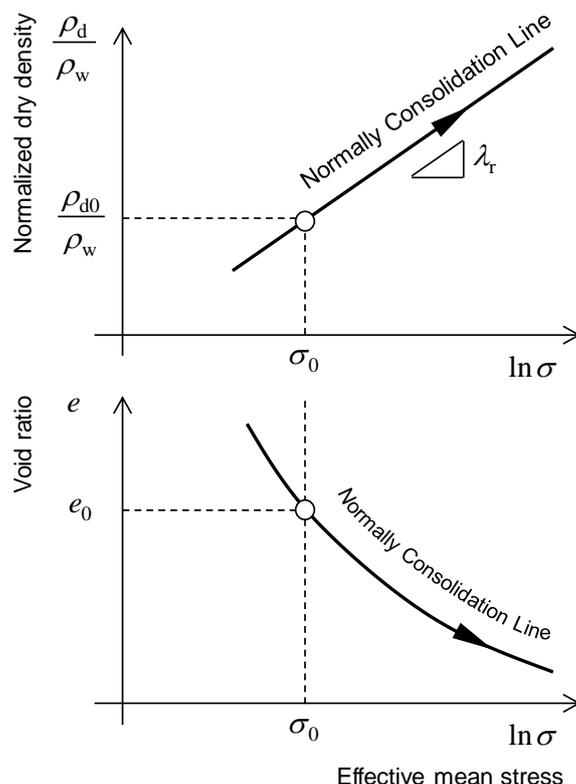


図 5.2.2-1 正規圧密曲線

式 5.2-1 と式 5.2-2 は同義であるが、さらにこれを体積ひずみ ε_v で表現する。微小ひずみを仮定し、初期（ひずみゼロ）状態を間隙比 $e = e_0$ に対応する状態にとると、体積ひずみは次式で表される。

$$\varepsilon_v = \frac{e_0 - e}{1 + e_0} \quad \text{式-5.2-5}$$

体積ひずみは圧縮（間隙比が減少）を正にとっている。ここに式 5.2-2 を代入し整理すると、次式が得られる。

$$\varepsilon_v = \frac{(1 + e_0) \lambda_r \ln \frac{\sigma}{\sigma_0}}{G_s + (1 + e_0) \lambda_r \ln \frac{\sigma}{\sigma_0}} \quad \text{式 5.2-6}$$

この式は、正規圧密状態の応力 σ - ひずみ ε_v 関係である。ところで、正規圧密状態から圧密圧力を減じる除荷過程の応答を考えると、その経路は正規圧密曲線を辿ることはなく、非可逆な挙動

を示すことが、除荷過程を含む圧密試験の結果から示唆される。非可逆な挙動とは、圧密圧力が元の応力 σ_0 に戻ったとしても、間隙比あるいは乾燥密度が完全には回復しないということである。材料の力学挙動に可逆性を仮定し、載荷・除荷に関わらず応力-ひずみ関係が常に正規圧密曲線を満足すると言うのであれば、構成関係に式 5.2-5 を採用すれば良い。しかしながら、非可逆性を受け入れる以上、構成関係は式 5.2-5 では完結せず、弾塑性論に基づいた記述が必要になる。

(2) 弾塑性論に基づく圧密応答の記述の概要

弾塑性論に基づいた記述では、式 5.2-5 の体積ひずみに含まれる弾性成分 ε_v^e と塑性成分 ε_v^p の両方を応力の関数として定式化できることが要件となる。特に、塑性体積ひずみ ε_v^p をひずみ型硬化パラメータとすることを常套とする地盤材料の弾塑性構成則においては、必須の要件となる。さて、体積ひずみ ε_v がこれら二成分で構成されると考えるのが弾塑性論であるから、

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^e + \varepsilon_v^p \quad \text{式 5.2-7}$$

なる関係が常に満足される。この式の左辺、すなわち体積ひずみ ε_v は、すでに式 5.2-5 のように応力の関数で与えられている。したがって、右辺の成分のどちらかが定式化されれば、自ずとも一方が定まる。通常は、正規圧密状態にある元の応力 σ_0 から任意の応力 σ ($> \sigma_0$)に至るまでに生じる弾性体積ひずみ ε_v^e が、応力 σ から元の応力 σ_0 に戻す除荷過程で生じる可逆変形と等価であると見做して、弾性体積ひずみ ε_v^e を先に定めることになる¹。

ところで、この手順に従うと、正規圧密線と除荷膨潤線の両方が $e-\ln\sigma$ 関係において直線近似できると仮定した場合、それぞれの勾配を圧縮指数 λ と膨潤指数 κ とすれば、体積ひずみは

$$\varepsilon_v = \frac{\lambda}{1+e_0} \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad \text{式 5.2-8}$$

となり、弾性体積ひずみは

$$\varepsilon_v^e = \frac{\kappa}{1+e_0} \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad \text{式 5.2-9}$$

と定式化される。ひいては、塑性体積ひずみが次式のように与えられる。

$$\varepsilon_v^p = \varepsilon_v - \varepsilon_v^e = \frac{\lambda - \kappa}{1+e_0} \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad \text{式 5.2-10}$$

これらの数理構造は明快であり、単に係数が異なるという点のみならず、最終的に得られた式 5.2-9 の塑性体積ひずみも、次のような逆関係を容易に得ることができるという利点がある。

$$\sigma = \sigma_0 \exp \frac{\varepsilon_v^p}{(\lambda - \kappa)/(1+e_0)} \quad \text{式 5.2-11}$$

この逆関係を明示できることは、応力型の硬化パラメータである圧密降伏応力を算定するうえで重要な意味を持つ。さらに、式 5.2-7 から式 5.2-9 の時間微分をとると、

$$\dot{\varepsilon}_v = \frac{\lambda}{1+e_0} \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \quad \text{式 5.2-12}$$

¹ 必ずしも、「除荷過程で生じる可逆変形＝弾性変形」ではないため、ややこしい表現になっている。理論上、「可逆変形」に「塑性変形」が含まれても、何の問題もない。

$$\dot{\varepsilon}_v^e = \frac{\kappa}{1+e_0} \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \quad \text{式 5.2-13}$$

$$\dot{\varepsilon}_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1+e_0} \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \quad \text{式 5.2-14}$$

が得られ、体積ひずみ速度についても

$$\dot{\varepsilon}_v = \dot{\varepsilon}_v^e + \dot{\varepsilon}_v^p \quad \text{式 5.2-15}$$

のような、弾性・塑性成分への加算分解を満足することが確認できる。

(3) 媒介変数の導入

乾燥密度 ρ_d と圧密応力の対数 $\ln \sigma$ の関係を直線近似した正規圧密曲線に対しても、体積ひずみの加算性と体積ひずみ速度の加算性を同時に満足する弾性・塑性成分の定式化を得たい。また、分解した後に、応力の関数で記述される各体積ひずみ（または各体積ひずみ速度）が、係数が異なるだけの同じ関数形となるのが好ましい。同じ関数形を得ることは必要条件ではないが、Cam-clay モデルに代表される既往の地盤材料の弾塑性構成則のフレームワークと同様の展開を望めることが好ましい理由である。式 5.2-5 を弾塑性分解することが目標の 1 つとなるが、式 5.2-5 から議論を開始すると展開が複雑になるので、正規圧密曲線を間隙比 e で表現した式 5.2-2 に遡って議論を進めたい。ここに式 5.2-2 を再掲すると、次のようである。

$$\frac{G_s}{1+e} - \lambda_r \ln \sigma = \frac{G_s}{1+e_0} - \lambda_r \ln \sigma_0 \quad \text{式 5.2-2 再掲}$$

ここで、式 5.2-2 を体積ひずみの式で表したときに、式 5.2-7 のような形式となるべく、次の変数 τ を新たに定義する。

$$\tau = \sigma^{(1+e)} \Leftrightarrow \ln \tau = (1+e) \ln \sigma \quad \text{式 5.2-16}$$

この式中でも e は間隙比である。変数 τ は単なる媒介変数であり、定義から明らかなように応力と同じ単位を持たない。式 5.2-15 を式 5.2-2 に代入すると、

$$\frac{G_s}{1+e} - \frac{\lambda_r}{1+e} \ln \tau = \frac{G_s}{1+e_0} - \frac{\lambda_r}{1+e_0} \ln \tau_0 \quad \text{式 5.2-17}$$

が得られる。別の形式では、

$$\frac{1+e}{1+e_0} = \frac{G_s - \lambda_r \ln \tau}{G_s - \lambda_r \ln \tau_0} \quad \text{式 5.2-18}$$

と記述することもできよう。また、間隙比 e についての式で表すと

$$e = e_0 - (1+e_0) \frac{\lambda_r}{G_s - \lambda_r \ln \tau_0} \ln \frac{\tau}{\tau_0} \equiv e_0 - \tilde{\lambda} \ln \frac{\tau}{\tau_0} \quad \text{式 5.2-19}$$

となる。ここで

$$\tilde{\lambda} \equiv (1+e_0) \frac{\lambda_r}{G_s - \lambda_r \ln \tau_0} \quad \text{式 5.2-20}$$

と置いた。式 5.2-18 は、間隙比 e と媒介変数 τ の対数の関係 ($e - \ln \tau$ 関係) においても、正規圧密曲線が直線で与えられることを意味している。係数 $\tilde{\lambda}$ はその勾配であり、正規圧密曲線上の一点 $(e, \tau) = (e_0, \tau_0)$ (ただし、 $\ln \tau_0 = (1+e_0) \ln \sigma_0$) が与えられることにより定まる。この点を体積ひずみの起点にとると、体積ひずみは次のように記述できる。

$$\varepsilon_v = \frac{e_0 - e}{1+e_0} = \frac{\tilde{\lambda}}{1+e_0} \ln \frac{\tau}{\tau_0} \quad \text{式 5.2-21}$$

上式は、正規圧密曲線を体積ひずみの式で表したものであり、逆れば、式 5.2-1 や式 5.2-2 と同義である。

次に、膨潤曲線の定式化に移る。正規圧密曲線が唯一に規定されることに対して、膨潤曲線は勾配の取り方、つまり、いずれの平面上で平行性を仮定するかによって、記述も異なることになる。まず、正規圧密曲線と同様に、膨潤曲線についても乾燥密度 ρ_d と圧密応力の対数 $\ln \sigma$ の直線関係が成り立つと仮定する。さらに、正規圧密曲線上の状態点 $(\rho_d, \sigma) = (\rho_{d0}, \sigma_0)$ からの膨潤曲線の傾きが勾配 κ_r で与えられるとする。このとき、膨潤曲線を乾燥密度 ρ_d の式で表すと、

$$\frac{\rho_d}{\rho_w} = \kappa_r \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} + \frac{\rho_{d0}}{\rho_w} \quad \text{式 5.2-22}$$

となる。また、同義であるが、間隙比 e の式で表せば、

$$\frac{G_s}{1+e} - \kappa_r \ln \sigma = \frac{G_s}{1+e_0} - \kappa_r \ln \sigma_0 \quad \text{式 5.2-23}$$

となる。さらに、式 5.2-15 の媒介変数 τ を用いて記述すれば、

$$\frac{1+e}{1+e_0} = \frac{G_s - \kappa_r \ln \tau}{G_s - \kappa_r \ln \tau_0} \quad \text{式 5.2-24}$$

$$e = e_0 - (1+e_0) \frac{\kappa_r}{G_s - \kappa_r \ln \tau_0} \ln \frac{\tau}{\tau_0} \equiv e_0 - \tilde{\kappa} \ln \frac{\tau}{\tau_0} \quad \text{式 5.2-25}$$

が得られる。ただし、

$$\tilde{\kappa} \equiv (1+e_0) \frac{\kappa_r}{G_s - \kappa_r \ln \tau_0} \quad \text{式 5.2-26}$$

と置いた。式 5.2-18 と同様、間隙比 e と媒介変数 τ の対数の関係 ($e - \ln \tau$ 関係) において、状態点 $(e, \tau) = (e_0, \tau_0)$ からの膨潤曲線も直線となることが確認できる。

一方、式 5.2-21 とは異なる、正規圧密曲線上の別の状態点 $(\rho_d, \sigma) = (\rho_{dc}, \sigma_c)$ からの膨潤曲線を考えてみる。この膨潤曲線も $(\rho_d/\rho_w) - \ln \sigma$ 平面上で直線になると仮定するが、勾配は定数 $\bar{\kappa}_r$ とし、定数

κ_r と区別しておく。すると、この膨潤曲線は乾燥密度 ρ_d の式として次のように書くことができる。

$$\frac{\rho_d}{\rho_w} = \bar{\kappa}_r \ln \frac{\sigma}{\sigma_c} + \frac{\rho_{dc}}{\rho_w} \quad \text{式 5.2-27}$$

また、間隙比 e の式では

$$\frac{G_s}{1+e} - \bar{\kappa}_r \ln \sigma = \frac{G_s}{1+e_c} - \bar{\kappa}_r \ln \sigma_c \quad \text{式 5.2-28}$$

となり、媒介変数 τ を用いて表すと

$$\frac{1+e}{1+e_c} = \frac{G_s - \bar{\kappa}_r \ln \tau}{G_s - \bar{\kappa}_r \ln \tau_c} \quad \text{式 5.2-29}$$

$$e = e_c - (1+e_c) \frac{\bar{\kappa}_r}{G_s - \bar{\kappa}_r \ln \tau_c} \ln \frac{\tau}{\tau_c} \equiv e_c - \tilde{\kappa}_c \ln \frac{\tau}{\tau_c} \quad \text{式 5.2-30}$$

となる。ただし、

$$\tilde{\kappa}_c \equiv (1+e_c) \frac{\bar{\kappa}_r}{G_s - \bar{\kappa}_r \ln \tau_c} \quad \text{式 5.2-31}$$

と置いた。式 5.2-29 は、 $e - \ln \tau$ 関係での正規圧密曲線上の状態点 $(e, \tau) = (e_c, \tau_c)$ からの膨潤曲線も直線となることを示すが、同時に、その勾配 $\tilde{\kappa}_c$ は状態点 $(e, \tau) = (e_c, \tau_c)$ の取り方に依存することを意味する。つまり、条件 $\kappa_r = \bar{\kappa}_r$ を満たせば、自ずと関係 $\tilde{\kappa} \neq \tilde{\kappa}_c$ が成り立つことになる。この考え方は、 $(\rho_d/\rho_w) - \ln \sigma$ 平面上での複数の膨潤曲線が互いに平行であることを仮定すれば、 $e - \ln \tau$ 平面上に変換された膨潤曲線は平行にならないということと等価である。

逆に、 $e - \ln \tau$ 平面上の複数の膨潤曲線が互いに平行 ($\tilde{\kappa} = \tilde{\kappa}_c$) であると仮定して、 $(\rho_d/\rho_w) - \ln \sigma$ 平面上の膨潤曲線が互いに平行にならないという見方 ($\kappa_r \neq \bar{\kappa}_r$) も可能である。このとき、勾配 $\bar{\kappa}_r$ は除荷の起点となる圧密降伏応力 σ_c に依存することが予想されるが、実際にどのように依存するか導いておこう。 $e - \ln \tau$ 平面上の膨潤曲線の勾配が常に等しくなることから、次式が成り立つ。

$$\tilde{\kappa} \equiv \tilde{\kappa}_c \quad \text{式 5.2-32}$$

二つの勾配の定義は、式 5.2-25 と式 5.2-30 に示す通りであり、

$$(1+e_0) \frac{\kappa_r}{G_s - \kappa_r \ln \tau_0} = (1+e_c) \frac{\bar{\kappa}_r}{G_s - \bar{\kappa}_r \ln \tau_c} \quad \text{式 5.2-33}$$

が成り立つ。また、書き換えると、

$$\kappa_r \left(\frac{G_s}{1+e_c} - \frac{\bar{\kappa}_r}{1+e_c} \ln \tau_c \right) = \bar{\kappa}_r \left(\frac{G_s}{1+e_0} - \frac{\kappa_r}{1+e_0} \ln \tau_0 \right) \quad \text{式 5.2-34}$$

となる。上式に媒介変数の定義を代入すると、

$$\kappa_r \left(\frac{G_s}{1+e_c} - \bar{\kappa}_r \ln \sigma_c \right) = \bar{\kappa}_r \left(\frac{G_s}{1+e_0} - \kappa_r \ln \sigma_0 \right) \quad \text{式 5.2-35}$$

のようになる。ただし、 $\ln \tau_c = (1+e_c) \ln \sigma_c$ と置いている。さらに、間隙比を乾燥密度に変換すると、

$$\kappa_r \left(\frac{\rho_{dc}}{\rho_w} - \bar{\kappa}_r \ln \sigma_c \right) = \bar{\kappa}_r \left(\frac{\rho_{d0}}{\rho_w} - \kappa_r \ln \sigma_0 \right) \quad \text{式 5.2-36}$$

となる。最終的に、勾配 $\bar{\kappa}_r$ の式に書き改めると、次式が成り立つ。

$$\bar{\kappa}_r = \frac{\frac{\rho_{dc}}{\rho_w}}{\frac{\rho_{d0}}{\rho_w} + \kappa_r \ln \frac{\sigma_c}{\sigma_0}} \kappa_r = \frac{\frac{\rho_{d0}}{\rho_w} + \lambda_r \ln \frac{\sigma_c}{\sigma_0}}{\frac{\rho_{d0}}{\rho_w} + \kappa_r \ln \frac{\sigma_c}{\sigma_0}} \kappa_r \quad \text{式 5.2-37}$$

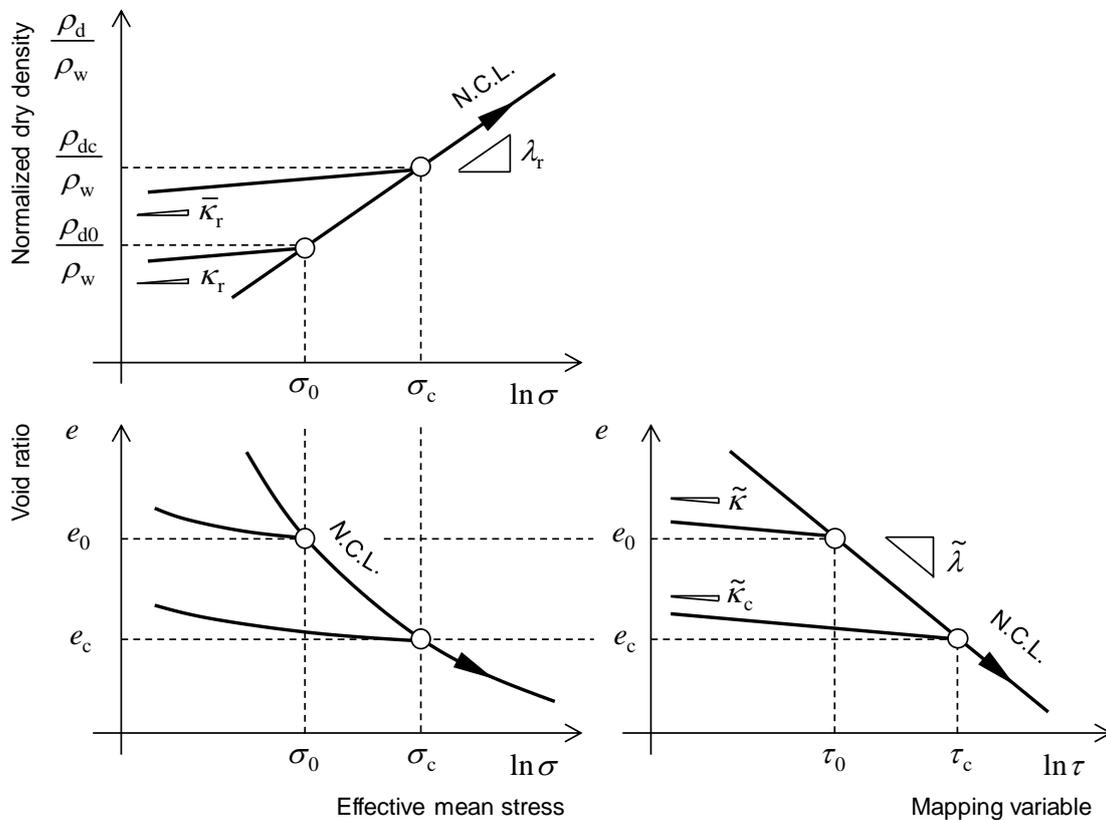


図 5.2.2-2 種々の平面で描かれる正規圧密曲線と膨潤曲線

ただし、最後の等式に置いて、状態点 (ρ_{d0}, σ_0) と状態点 (ρ_{dc}, σ_c) の両方が正規圧密曲線上にあり、

$$\frac{\rho_{dc}}{\rho_w} = \lambda_r \ln \frac{\sigma_c}{\sigma_0} + \frac{\rho_{d0}}{\rho_w} \quad \text{式 5.2-38}$$

なる関係が成り立つことを用いている。媒介変数を用いた Imaginary な平面である $e - \ln \tau$ 平面上において膨潤曲線が平行性を有するとき、 $(\rho_d / \rho_w) - \ln \sigma$ 平面上の膨潤曲線の勾配は、式 5.2-36 を

満足するように圧密降伏応力 σ_c に依存することになる。

$(\rho_d/\rho_w)-\ln \sigma$ 平面上の膨潤曲線の勾配について、以上のように二つの記述方法が導かれた。勾配が一定 ($\kappa_r = \bar{\kappa}_r$) とする記述方法と、式 5.2-36 を満たす圧密降伏応力 σ_c の依存性を持つ記述方法である。後者は、 $e-\ln \tau$ 平面上の複数の膨潤曲線が互いに平行 ($\tilde{\kappa} = \tilde{\kappa}_c$) であることと等価である。これらのどちらが相応しいかは、本来、実験事実に拠るところであるが、以降の展開を容易にすることに重点をおき、後者の記述方法を採用する。

図-2 に、正規圧密曲線と膨潤曲線を図示する。

(4) 正規圧密状態を初期状態に採ったときの各体積ひずみの記述

正規圧密線上にある二点、すなわち、状態点 (e_0, σ_0) と状態点 (e_c, σ_c) (ただし、 $\sigma_0 < \sigma_c$ とする) に成り立つ関係は、媒介変数を用いると、式 5.2-18 より

$$e_c - e_0 = -\tilde{\lambda} \ln \frac{\tau_c}{\tau_0}; \quad \tilde{\lambda} \equiv (1 + e_0) \frac{\lambda_r}{G_s - \lambda_r \ln \tau_0} \quad \text{式 5.2-39}$$

となる。このような間隙比変化に対して、弾性成分と見做せる可逆な間隙比変化は応力 σ_c から応力 σ_0 に至る除荷過程で生じる膨潤量と等価である。応力 σ_c からの膨潤曲線に従う応答であることから、膨潤量は、式 5.2-29 より

$$e_x - e_c = -\tilde{\kappa}_c \ln \frac{\tau_0}{\tau_c}; \quad \tilde{\kappa}_c \equiv (1 + e_c) \frac{\bar{\kappa}_r}{G_s - \bar{\kappa}_r \ln \tau_c} \quad \text{式 5.2-40}$$

となる²。ただし、間隙比 e_x は除荷後の応力 σ_0 に対応する間隙比である。体積ひずみの起点を間隙比 e_0 にとると、体積ひずみ ε_v は

$$\varepsilon_v = \frac{e_0 - e_c}{1 + e_0} = \frac{\tilde{\lambda}}{1 + e_0} \ln \frac{\tau_c}{\tau_0} \quad \text{式 5.2-41}$$

となる。また、体積ひずみは次のように分解できる。

$$\varepsilon_v = \frac{e_0 - e_c}{1 + e_0} = \frac{e_x - e_c}{1 + e_0} + \frac{e_0 - e_x}{1 + e_0} \equiv \varepsilon_v^e + \varepsilon_v^p \quad \text{式 5.2-42}$$

したがって、式 5.2-39 から弾性体積ひずみ ε_v^e は、

$$\varepsilon_v^e = \frac{e_x - e_c}{1 + e_0} = \frac{\tilde{\kappa}_c}{1 + e_0} \ln \frac{\tau_c}{\tau_0} \quad \text{式 5.2-43}$$

² 式 6.3-39 は厳密には、

$$e_x - e_c = -\tilde{\kappa}_c \ln \frac{\tau_x}{\tau_c}; \quad \ln \tau_x \equiv (1 + e_x) \ln \sigma_0$$

としなければならない。応力 σ_0 まで除荷されたときの間隙比は $e = e_x (\neq e_0)$ であり、それに対応する媒介変数は $\tau = \tau_x (\neq \tau_0)$ となる。しかしここでは、後の誘導のしやすさを優先し、 $\tau_x \approx \tau_0$ と置いた。

となる。このとき、勾配 $\tilde{\kappa}_c$ が除荷の起点となる先行圧密状態における間隙比 e_c と応力 σ_c の関数となることに注意しなければならないが、 $e-\ln\tau$ 平面上の複数の膨潤曲線が互いに平行であるとするにより、勾配 $\tilde{\kappa}_c$ を一定値の勾配 $\tilde{\kappa}$ に置き換えることができる。すなわち、

$$\varepsilon_v^c = \frac{\tilde{\kappa}}{1+e_0} \ln \frac{\tau_c}{\tau_0} ; \quad \tilde{\kappa} \equiv (1+e_0) \frac{\kappa_r}{G_s - \kappa_r \ln \tau_0} \quad \text{式 5.2-44}$$

と置換できる。ひいては、塑性体積ひずみ ε_v^p が

$$\varepsilon_v^p = \varepsilon_v - \varepsilon_v^c = \frac{\tilde{\lambda} - \tilde{\kappa}}{1+e_0} \ln \frac{\tau_c}{\tau_0} \quad \text{式 5.2-45}$$

となる。この逆関係は、応力型硬化パラメータの式として表現される硬化則として

$$\tau_c = \tau_0 \exp \left(\frac{\varepsilon_v^p}{(\tilde{\lambda} - \tilde{\kappa}) / (1+e_0)} \right) \quad \text{式 5.2-46}$$

となる。

仮定 $\tilde{\kappa} = \tilde{\kappa}_c$ を置かない場合、式 5.2-43 以降の各式の右辺に含まれる勾配 $\tilde{\kappa}$ を、勾配 $\tilde{\kappa}_c$ に戻さなければならない。式 5.2-30 に示すように、勾配 $\tilde{\kappa}_c$ は媒介変数 τ_c の関数であることから、例えば式 5.2-45 は、右辺にも媒介変数 τ_c を含む形となる。このとき、媒介変数 τ_c の式に書き換えることができれば良いのだが、陽に記述することは困難である。このような困難さを回避することが、仮定 $\tilde{\kappa} = \tilde{\kappa}_c$ を置いた理由である。

(5) 過圧密状態を初期状態に採ったときの体積ひずみの記述

ここまでは正規圧密線上にある状態点からの各体積ひずみの定式化について記してきたが、より一般的な初期状態として、膨潤曲線上にある過圧密な状態点からの定式化を以下に示す。ここまでの定式化の特徴を要約すると、次の通りである。

- ・ 正規圧密曲線と膨潤曲線はいずれも、 $(\rho_d/\rho_w)-\ln\sigma$ 平面上で直線性を仮定する
- ・ 媒介変数 τ を導入することにより、正規圧密曲線と膨潤曲線はいずれも、 $e-\ln\tau$ 平面上で直線となる
- ・ 正規圧密曲線上の任意点から描かれる複数の膨潤曲線は、 $e-\ln\tau$ 平面上で、互いに平行になると仮定する。この仮定により、 $(\rho_d/\rho_w)-\ln\sigma$ 平面上では複数の膨潤曲線は平行にならない。

正規圧密曲線上の先行圧密状態 $(\rho_{d0}, e_0, \sigma_0, \tau_0)$ から除荷履歴を受けた状態 $(\rho_{di}, e_i, \sigma_i, \tau_i)$ を初期状態に採る。この初期状態は先行圧密状態を通る膨潤曲線上になければならない。初期応力 σ_i から正規圧密曲線上の任意の応力 σ （ただし、 $\sigma > \sigma_0$ ）に至るまでの間隙比変化は、次のようになる。

$$\Delta e = e - e_i = (e - e_0) + (e_0 - e_i) = -\tilde{\lambda} \ln \frac{\tau}{\tau_0} - \tilde{\kappa} \ln \frac{\tau_0}{\tau_i} \quad \text{式 5.2-47}$$

この間隙比変化の中の弾性成分 Δe^e は、応力 σ から応力 σ_i まで除荷したときに生じる膨潤量に等しい。すなわち、

$$\Delta e^e = -\tilde{\kappa} \ln \frac{\tau}{\tau_i} \quad \text{式 5.2-48}$$

となる³。ひいては、間隙比変化に占める塑性成分 Δe^p が

$$\Delta e^p = \Delta e - \Delta e^e = -(\tilde{\lambda} - \tilde{\kappa}) \ln \frac{\tau}{\tau_0} \quad \text{式 5.2-49}$$

と定まる。次に、式 5.2-46 から式 5.2-48 の各間隙比変化を基に各体積ひずみを記述する。塑性体積ひずみが生じ始める状態、すなわち間隙比 $e = e_0$ をひずみの基準に採ると、塑性体積ひずみ ε_v^p は

$$\varepsilon_v^p = -\frac{\Delta e^p}{1+e_0} = \frac{\tilde{\lambda} - \tilde{\kappa}}{1+e_0} \ln \frac{\tau}{\tau_0} \quad \text{式 5.2-50}$$

となる。式 5.2-44 と比較すると明らかなように、塑性体積ひずみは初期条件の採りに依らず、一個の式で記述できる。ただし、正規圧密状態では等式 $\tau = \tau_c$ が成り立つことに留意する。ところで、

$$\varepsilon_v^p = -\frac{\Delta e^p}{1+e_0} = -\frac{\Delta e - \Delta e^e}{1+e_0} = \left(-\frac{\Delta e}{1+e_0} \right) - \left(-\frac{\Delta e^e}{1+e_0} \right) \equiv \varepsilon_v - \varepsilon_v^e \quad \text{式 5.2-51}$$

が成り立つので、体積ひずみ ε_v と弾性体積ひずみ ε_v^e はそれぞれ

$$\varepsilon_v = -\frac{\Delta e}{1+e_0} = \frac{\tilde{\lambda}}{1+e_0} \ln \frac{\tau}{\tau_0} + \frac{\tilde{\kappa}}{1+e_0} \ln \frac{\tau_0}{\tau_i} \quad \text{式 5.2-52}$$

$$\varepsilon_v^e = -\frac{\Delta e^e}{1+e_0} = \frac{\tilde{\kappa}}{1+e_0} \ln \frac{\tau}{\tau_i} \quad \text{式 5.2-53}$$

となる。これら体積ひずみの時間微分をとれば、各体積ひずみ速度が次のように得られる。

$$\dot{\varepsilon}_v = \frac{\tilde{\lambda}}{1+e_0} \frac{\dot{\tau}}{\tau} \quad \text{式 5.2-54}$$

³ 注釈 2 と同様、式 5.2-47 は厳密には、

$$\Delta e^e = -\tilde{\kappa} \ln \frac{\tau}{\tau_x}; \quad \ln \tau_x \equiv (1+e_x) \ln \sigma_i$$

としなければならない。応力 σ_i まで除荷されたときの間隙比は $e = e_x (\neq e_i)$ であり、それに対応する媒介変数は $\tau = \tau_x (\neq \tau_i)$ となる。しかしここでは、後の誘導のしやすさを優先し、 $\tau_x \approx \tau_i$ と置いた。

$$\dot{\epsilon}_v^e = \frac{\tilde{\kappa}}{1+e_0} \frac{\dot{\tau}}{\tau} \quad \text{式 5.2-55}$$

$$\dot{\epsilon}_v^p = \frac{\tilde{\lambda} - \tilde{\kappa}}{1+e_0} \frac{\dot{\tau}}{\tau} \quad \text{式 5.2-56}$$

体積ひずみ速度についても、弾塑性分解の加算性が成立することは上式から明らかである。以上が、応力 σ が正規圧密曲線上、すなわち弾塑性状態にあるときに満足すべき式である。

一方、応力 σ が膨潤曲線上、すなわち弾性状態にあるとき、あらゆる膨潤曲線について次式が成立する。

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_v^e = \frac{\tilde{\kappa}}{1+e_0} \frac{\dot{\tau}}{\tau} \quad (\text{and } \dot{\epsilon}_v^p = 0) \quad \text{式 5.2-57}$$

式 5.2-54 と式 5.2-56 が一致することから、式 5.2-54 を状態に関わらず常に成立する弾性構成関係と見做すことができ、逆関係を得ると、

$$\dot{\tau} = \frac{1+e_0}{\tilde{\kappa}} \tau \dot{\epsilon}_v^e \equiv K \dot{\epsilon}_v^e; \quad K \equiv \frac{1+e_0}{\tilde{\kappa}} \tau \quad \text{式 5.2-58}$$

となる。

(6) 応力速度と体積ひずみ速度の関係

式 5.2-57 の弾性構成関係は、弾性体積ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_v^e$ と媒介変数の時間微分 $\dot{\tau}$ の関係を記述したものに過ぎない。実際に得たい関係は、弾性ひずみ速度と応力速度 $\dot{\sigma}$ の関係である。弾塑性構成関係を記述する前に、この関係を明らかにしておく。

式 5.2-58 と同じ形式で、体積ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_v$ と媒介変数の時間微分 $\dot{\tau}$ の関係を一般的に次のように記述する。

$$\dot{\tau} = C \dot{\epsilon}_v \quad \text{式 5.2-59}$$

ただし、

$$C = K \quad \text{for elastic state} \quad \text{式 5.2-60}$$

$$C = K^{ep} \quad \text{for elasto-plastic state} \quad \text{式 5.2-61}$$

とする。

ところで、媒介変数 τ の定義を再掲すると、

$$\ln \tau = (1+e) \ln \sigma \quad \text{式 5.2-15 再掲}$$

となる。この定義式の時間微分をとると、次の通りである。

$$\frac{\dot{\tau}}{\tau} = \dot{e} \ln \sigma + (1+e) \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \quad \text{式 5.2-62}$$

この式に間隙比と体積ひずみの関係式

$$\dot{e} = -(1+e_1) \dot{\varepsilon}_v \quad \text{式 5.2-63}$$

を代入すると、

$$\frac{\dot{\tau}}{\tau} = -(1+e_1) \dot{\varepsilon}_v \ln \sigma + (1+e) \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \quad \text{式 5.2-64}$$

となる。さらに、式(2-58)の構成関係を代入し、応力速度 $\dot{\sigma}$ について記述すると

$$\dot{\sigma} = \left[\frac{C}{\tau} + (1+e_1) \ln \sigma \right] \frac{\sigma}{1+e} \dot{\varepsilon}_v \quad \text{式 5.2-65}$$

となり、体積ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_v$ と応力速度 $\dot{\sigma}$ の関係が得られる。

(7) 弾塑性構成関係

ここでは、弾塑性状態での構成関係を導出する。塑性体積ひずみ ε_v^p をひずみ型の硬化パラメータとすると、式 5.2-49 より、降伏関数を次のように定義できる。

$$f = f(\tau, \varepsilon_v^p) = \frac{\tilde{\lambda} - \tilde{\kappa}}{1+e_0} \ln \frac{\tau}{\tau_0} - \varepsilon_v^p = 0 \quad \text{式 5.2-66}$$

弾塑性状態では、適合条件 ($\dot{f} = 0$) が成立する。すなわち

$$\dot{f} = \frac{\partial f}{\partial \tau} \dot{\tau} + \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \dot{\varepsilon}_v^p = 0 \quad \text{式 5.2-67}$$

が成り立つ。式(2-57)の弾性構成関係を代入すると

$$\frac{\partial f}{\partial \tau} K \dot{\varepsilon}_v^e + \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \dot{\varepsilon}_v^p = 0 \quad \text{式 5.2-68}$$

となる。また、体積ひずみ速度の弾塑性分解を考えると、

$$\frac{\partial f}{\partial \tau} K (\dot{\varepsilon}_v - \dot{\varepsilon}_v^p) + \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \dot{\varepsilon}_v^p = 0 \quad \text{式 5.2-69}$$

となる。塑性体積ひずみ速度に対して、流れ則を適用すると

$$\frac{\partial f}{\partial \tau} K \left(\dot{\varepsilon}_v - \gamma \frac{\partial f}{\partial \tau} \right) + \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \gamma \frac{\partial f}{\partial \tau} = 0 \quad \text{式 5.2-70}$$

となる。ただし、スカラー値 γ は非負の塑性乗数である。本報告書では、一次元的な応力変化のみ

を取り扱っている、「弾塑性状態において、媒介変数 τ が増加すれば、塑性体積ひずみが生じる ($\dot{\epsilon}_v^p > 0$)」という、正規圧密曲線に沿うごく当たり前の応答を、流れ則として記述しているに過ぎない。さて、式 5.2-69 を塑性乗数 γ について記述すると、次式が得られる。

$$\gamma = \frac{\frac{\partial f}{\partial \tau} K \dot{\epsilon}_v}{K \left(\frac{\partial f}{\partial \tau} \right)^2 - \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} \frac{\partial f}{\partial \tau}} \equiv \frac{1}{H} \frac{\partial f}{\partial \tau} K \dot{\epsilon}_v \quad \text{式 5.2-71}$$

$$; H \equiv K \left(\frac{\partial f}{\partial \tau} \right)^2 - \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} \frac{\partial f}{\partial \tau} \quad \text{式 5.2-72}$$

上式の塑性乗数 γ を、式 5.2-57 の弾性構成関係に代入すると、次のように弾塑性状態における構成関係を得ることができる。

$$\dot{\epsilon} = K \dot{\epsilon}_v^e = K (\dot{\epsilon}_v - \dot{\epsilon}_v^p) = K \dot{\epsilon}_v - \gamma K \frac{\partial f}{\partial \tau} = \left[K - \frac{1}{H} \left(K \frac{\partial f}{\partial \tau} \right)^2 \right] \dot{\epsilon}_v \equiv K^{ep} \dot{\epsilon}_v \quad \text{式 5.2-73}$$

$$; K^{ep} \equiv K - \frac{1}{H} \left(K \frac{\partial f}{\partial \tau} \right)^2 \quad \text{式 5.2-74}$$

この弾塑性構成関係から応力速度 $\dot{\sigma}$ を得る方法については、前節で述べた通りである。

(8) 圧密応答シミュレーション

図 5.2.2-3 は、Na 型ベントナイトの一次元圧密・除荷・再載荷経路、および同材料に対する一次元排気圧縮による飽和点を、完全飽和線とともに、示している。一次元圧密・除荷・再載荷経路は、3つの初期間隙比について得られたものであり、初期間隙比に依らず初期降伏の後の圧縮経路、すなわち正規圧密曲線がほぼ唯一の経路を辿っていることが分かる。一次元排気圧縮による飽和点は、異なる5つの含水比に対して得られたものである。小林らは、これらの飽和点を連ねた曲線を完全飽和線と呼び、乾燥密度と圧密応力の対数の関係に直線性を見出し、本報告書の式 5.2-1 のように定式化している。間隙比と圧密応力の対数の関係で完全飽和線を描くと、それが曲線になること、そして、正規圧密曲線と完全飽和線に一致性を見出せることが、本章におけるモデルの高度化の実験的な裏付けとなっている。

Na 型ベントナイトを想定し、本章で説明したモデルを用いた一次元圧密・除荷・再載荷のシミュレーションを行う。シミュレーションでは、土粒子比重 $G_s = 2.733$ の Na 型ベントナイトを想定し、材料パラメータとして圧縮指数 $\lambda_r = 0.156$ 、膨潤指数 $\kappa_r = 0.0156$ を仮定した。初期状態を初期応力 $\sigma_1 = 0.1$ MPa、初期乾燥密度 $\rho_{d1} = 1.414$ Mg/m³ (相当する初期間隙比 $e_1 = 0.933$) とし、また、先行圧密状態を先行圧密応力 $\sigma_0 = 1.0$ MPa、先行乾燥密度 $\rho_{d0} = 1.450$ Mg/m³ (相当する先行間隙比 $e_0 = 0.885$) とし、逐次、体積ひずみ増分を与える増分計算を行う。体積ひずみ増分は、圧密圧力が 10 MPa に至るまで正 (圧縮) とし、10 MPa に至ったら負 (膨潤) に転じる。その後、圧密圧力が 0.1 MPa まで減少したら、再度、体積ひずみ増分を正に反転して再圧縮の履歴を与える。

図 5.2.2-4 にシミュレーションの結果を示す。同一の応答を(a)乾燥密度と圧密圧力、(b)間隙比と圧密圧力、(c)間隙比と媒介変数の関係で表示している。経路は I・C・U・F の順であり、(a)(b)には正規圧密曲線 (=完全飽和線) を破線で併記している。図 5.2.2-4(a)(b)より、初期降伏と継続降伏後の載荷経路が破線で示す理論上の正規圧密曲線と一致しており、目的に叶った応答が得られていることが分かる。また、モデルで仮定したように、図 5.2.2-4(c)に見られる間隙比と媒介変数の対数の関係において、膨潤曲線は平行をなす。このとき、式 5.2-36 に示す関係に従って、図 5.2.2-4(a)に見られる乾燥密度と圧密圧力の対数の関係においては、膨潤曲線が平行にならない。このシミュレーションで用いたパラメータについて、図 5.2.2-5 に乾燥密度と圧密圧力の対数の関係における膨潤曲線の勾配の変化を示す。この勾配の変化は、定式化の流れの中で複雑さを回避するために設けた仮定に則って生まれたモデル上の性質であり、実現象としての除荷過程の特性を表すものではないことに注意する。ここでは、実験的に得られる正規圧密曲線を精緻に表現するためのモデルの高度化に主眼を置いたが、除荷過程に生じる著しい膨潤挙動を表現するためには、別の視点からの効果を導入する必要がある。

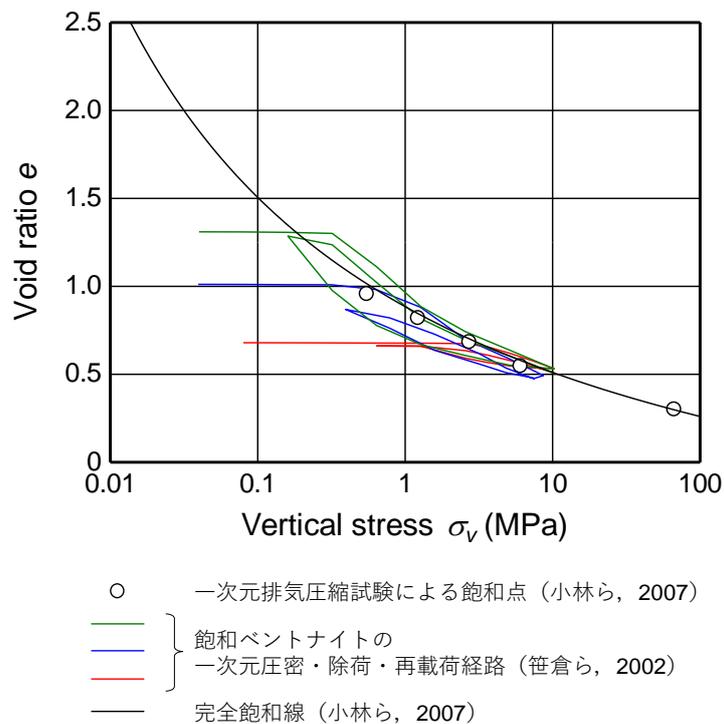


図 5.2.2-3 Na 型ベントナイトの飽和点及び正規圧密状態と完全飽和線

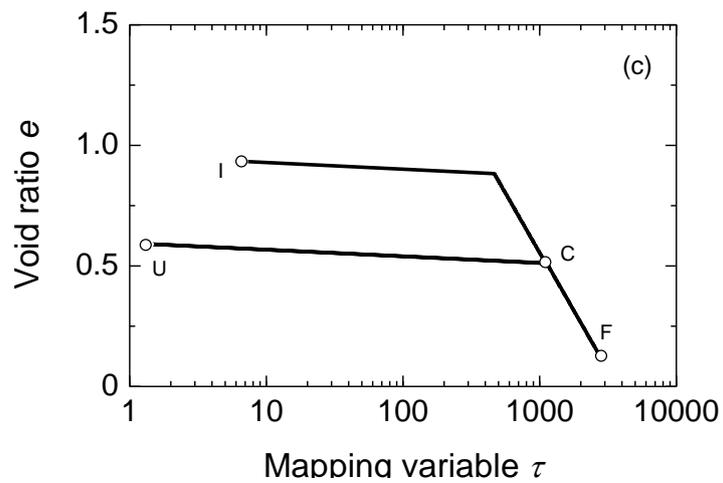
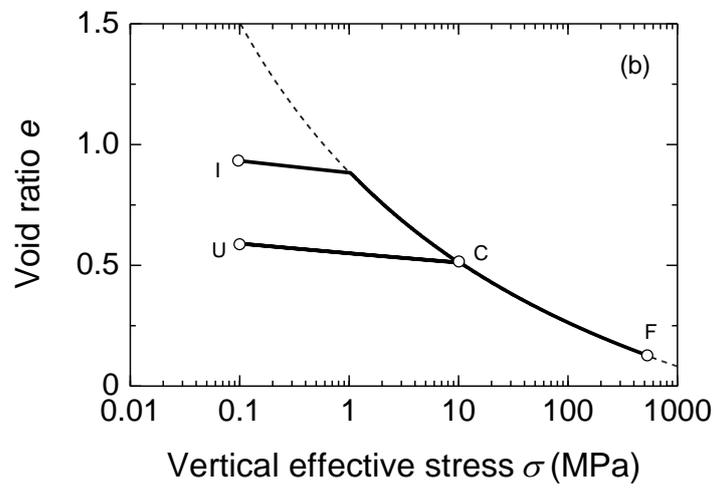
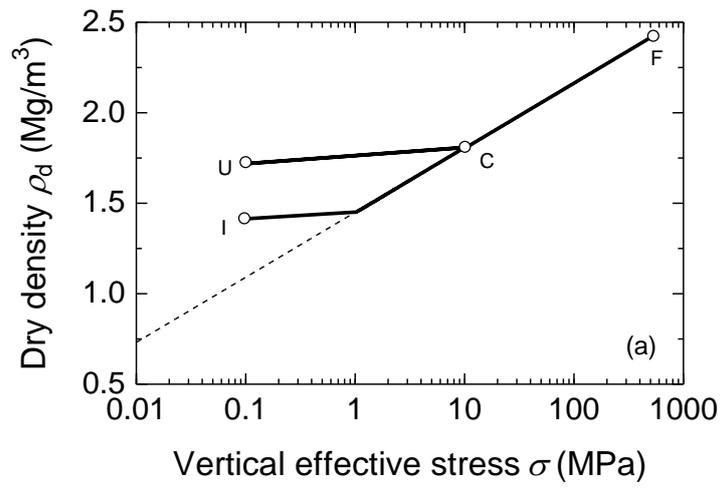


図 5.2.2-4 一次元圧密・除荷・再載荷シミュレーション結果

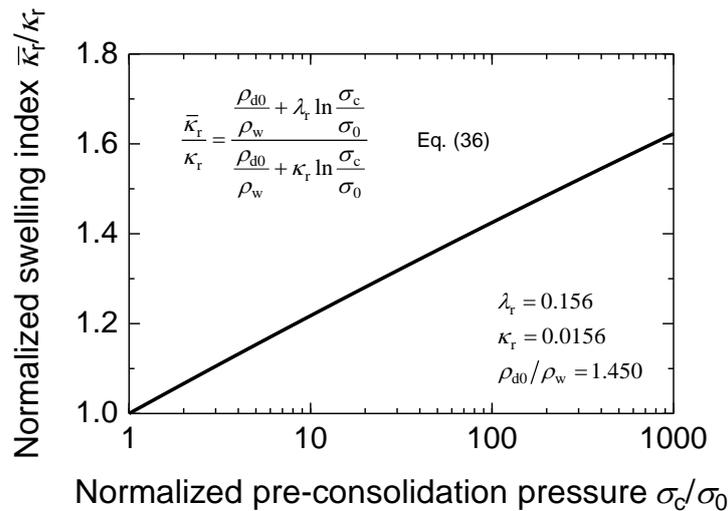


図 5.2.2-5 乾燥密度と圧密圧力の対数の関係で表した膨潤曲線の勾配の変化

5.2.3 まとめ

今年度は、圧密特性に関するモデルの高度化に取り組んだ。平均的な乾燥密度が一定であったとしても、どの程度、乾燥密度が不均一に分布するかを予測することが性能評価を行う上で、重要な課題となっている。不均一の度合いは境界条件や初期条件にも左右され、この度合いがどの程度生じるかを定量的に照査しようとしている。度合いが大きければ、乾燥密度の空間分布に差が生まれ、部分的に緩い領域が発生するということになる。この照査において大事なことは、予測解析に用いる構成モデルが広範囲の乾燥密度状態における力学応答の再現性を有しているということである。これがない限り、乾燥密度の不均一性について定量的な考察を深めることは、難しい。このために、再冠水過程を経て不飽和状態から飽和状態に至るまでの力学挙動を記述する構成モデルの高度化を図った。

広範囲の乾燥密度状態では、間隙比と圧密応力の対数の関係について直線性を仮定できないことが分かっている。間隙比と圧密応力の対数の関係において、非直線性を仮定した正規圧密曲線を定式化し、媒介変数の導入により、複雑な数理構造を有さない弾塑性構成モデルを構築した。

さらに、膨潤特性に関するモデルの高度化を検討した。既往の実験的研究から、除荷過程、再載荷過程における応力とひずみの関係に対して、除荷に伴う塑性膨張挙動を表現する効果を新たに導入し、モデルの高度化を図った。

本検討により、広範囲の乾燥密度状態において間隙比と圧密応力の関係を解析的に評価できる構成モデルが構築できたことは、今後の緩衝材の力学解析の進展につながることを期待される。

5.3 緩衝材の浸潤に関する解析手法の適応性の検討

—Numerical simulations as a tool to design and evaluate tests—

5.3.1 概要

本検討は、SKB（スウェーデンの放射性廃棄物処分実施主体）が行っている数値解析による評価手法を使った検討である。平成 29 年度は、平成 28 年度に室内で実施した浸透試験（原環センター、2017[22]）をモデル化するとともに、緩衝材の中心に熱源が存在する場合を想定した解析を実施した。

本項では、室内試験で設定した条件を対象とし、再冠水過程での緩衝材の浸潤期間における廃棄体からの熱による飽和プロファイルへの影響を把握・理解することを目的とする。

まず、温度を考慮しないケースをモデル化することで、実験結果を再現しモデルのキャリブレーションを行った後、熱源を考慮した状態をモデル化することとした。

5.3.2 対象とした室内試験

モデル化を行った室内試験は、平成 28 年度にモデル化した試験と同様の装置を用いた浸潤試験である。平成 28 年度との主な違いは、試験体が上端と下端の両方から注水されていることである（図 5.3.2-1）。試験では、まず流量制御下で試験体の上端および下端から注水を行った。注水圧の増加が認められたのち、圧力制御下での注水に移行し、試験体の中心に空気が加えられ、150kPa の圧力一定状態が保持される。なお、飽和プロファイルはベントナイトの比抵抗を測定することによって得られた。

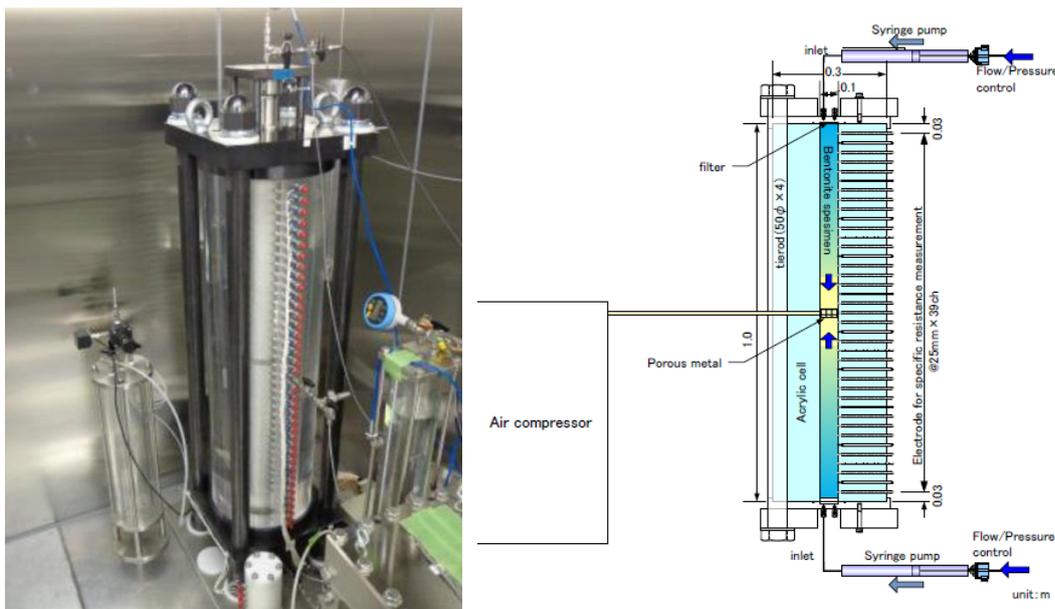


図 5.3.2-1 試験体の写真（左図）および模式図（右図）

5.3.3 解析方法

支配方程式は、熱輸送がモデル化されたことを除き平成 28 年度に用いたものと同様である（原環センター、2017）。モデルでは、水輸送はリチャード方程式で記述される。水蒸気輸送は、拡散方程式および熱方程式を用いて説明される。使用した熱方程式を式 5.3-1 に示す。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(\lambda \nabla T) = 0 \quad \text{式 5.3-1}$$

熱伝導率はベントナイト粘土中の密度と水分の両方に依存するので、関数として記述する必要がある。このモデルでは、Mx-80 を対象に良い一致を示した式 5.3-2 が使用されるが、室内試験で使用されたベントナイト材料の特性を正確に再現しているとは限らない。密度を $1,600\text{kg/m}^3$ として、式 5.3-2 により算出された熱伝導率に対する飽和度は（図 5.3.3-1）にプロットされている。

$$\lambda = 2.21(1 - (1 - \rho_d/2800) * (1 - S_r)) - 0.8857 \quad \text{式 5.3-2}$$

ここで、 ρ_d は乾燥密度、 S_r は飽和度である。

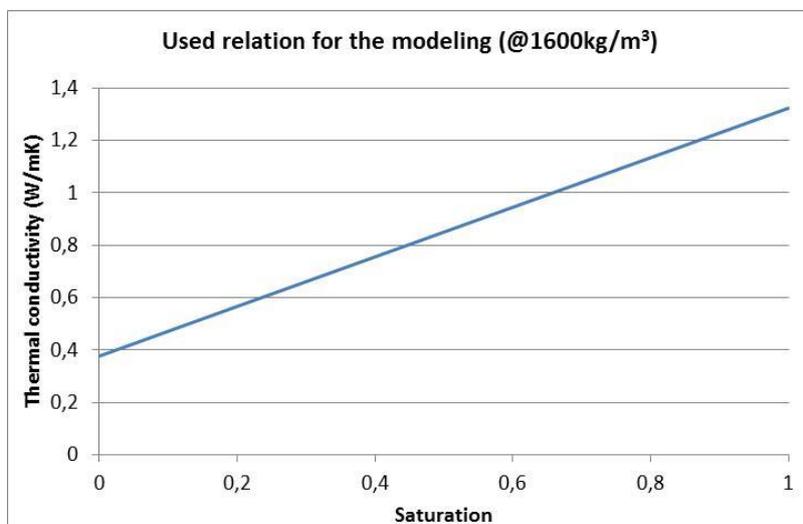


図 5.3.3-1 モデルで使用されるベントナイトの熱伝導率

熱を考慮すること（モデル試験体の中心における点源として）により発生する現象として、熱により温度が上昇するにつれ、水蒸気の分圧が増加し、拡散を促進する水蒸気濃度勾配が発生することが考えられる。水蒸気分圧は温度とともに増加し、結果として水蒸気は高温領域から切り離れて移行されるようになる。この移行は、含水率およびサクシヨンの勾配が蒸気拡散速度とバランスするのに十分に大きくなるまで継続する。

上述の通り、本モデルでは室内試験で使用したベントナイト材料の特性を必ずしも反映できていないが、いくつかの仮定を設け各種パラメータを調整することにより、最終結果と試験結果を

比較できる状態を実現することとした。水分保持曲線は仮定された特性の一つである(図 5.3.3-2)。膨潤圧も保持特性に影響する可能性が高いが、今回のモデル化ではこの影響は無視し、透水係数を試験結果に適合させることによって補完される。空隙圧は、MPa 程度のベントナイトのサクシオンに比べて小さいので無視することとする。

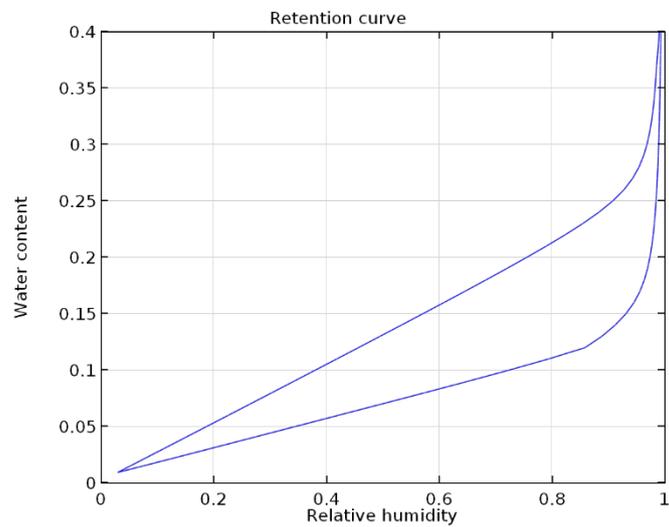


図 5.3.3-2 モデルで適用された保持曲線
(上部の線：乾燥曲線、下部の線：湿潤曲線)

試験装置の形状は1次元モデルとし、水圧 (p)、温度 (T)、水蒸気濃度 (c) の境界条件をモデル両端に設定した。熱源は、ベントナイト筒の中心の位置に設定した(図 5.3.3-3)。熱源の温度 (T) は 293K から 383K まで 10K ごとに変化させ、結果の応答を調べた。なお、 $T=293K$ の等温のケースにおいて、解析上の透水係数を室内試験の透水係数に適合させた。まず、温度一様の状態をモデル化し室内試験結果を再現した後、熱源をモデル化して飽和フロントの速度がどのように影響を受けるかを調べた。

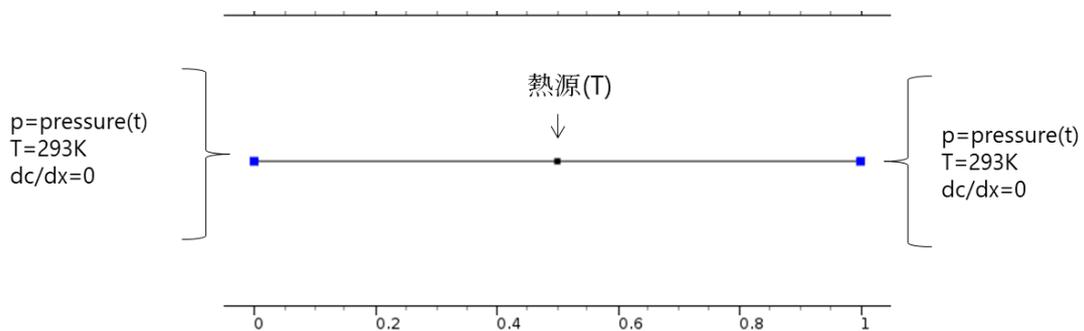


図 5.3.3-3 モデル化された試験系と境界条件

経時的に変化する系に供給される注水圧は、図 5.3.3-4 に示す圧力対時間の関数によりモデルに実装した。

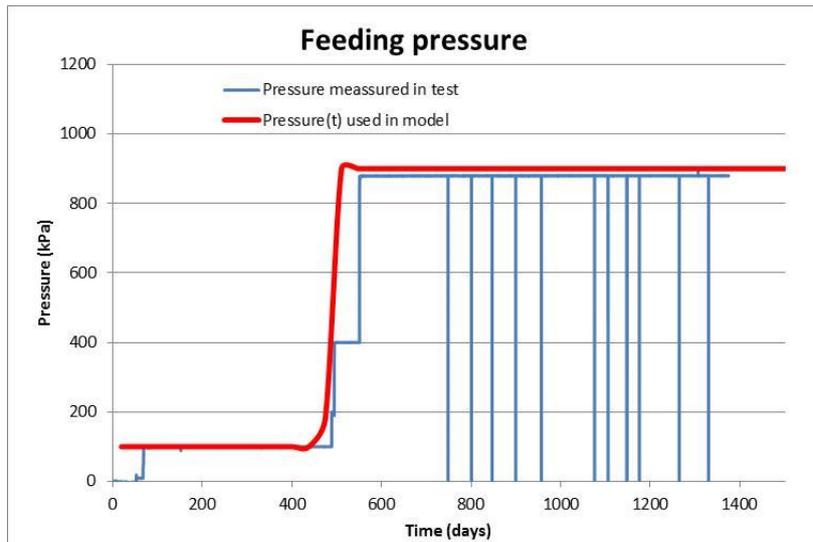


図 5.3.3-4 試験時の注水圧とモデル化された注水圧

5.3.4 解析結果

(1) 温度を考慮しないケース（標準ケース）

まず、温度を考慮しないケースを対象にモデルのキャリブレーションを行った。ベントナイトの透水係数は、室内試験で測定された水の流入量をほぼ再現することができた。この結果から、対象とした供試体の透水係数は 10^{-12} m/s 程度だといえる（図 5.3.4-1）。

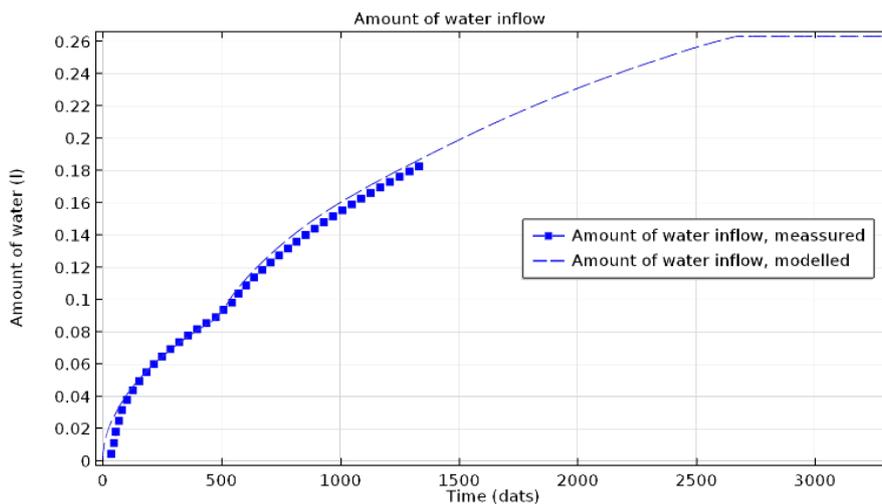


図 5.3.4-1 供試体への流入（浸潤）量

計算結果の飽和プロファイルと測定結果の比較より、試験で得られた飽和領域がよく再現されていた（図 5.3.4-2）。

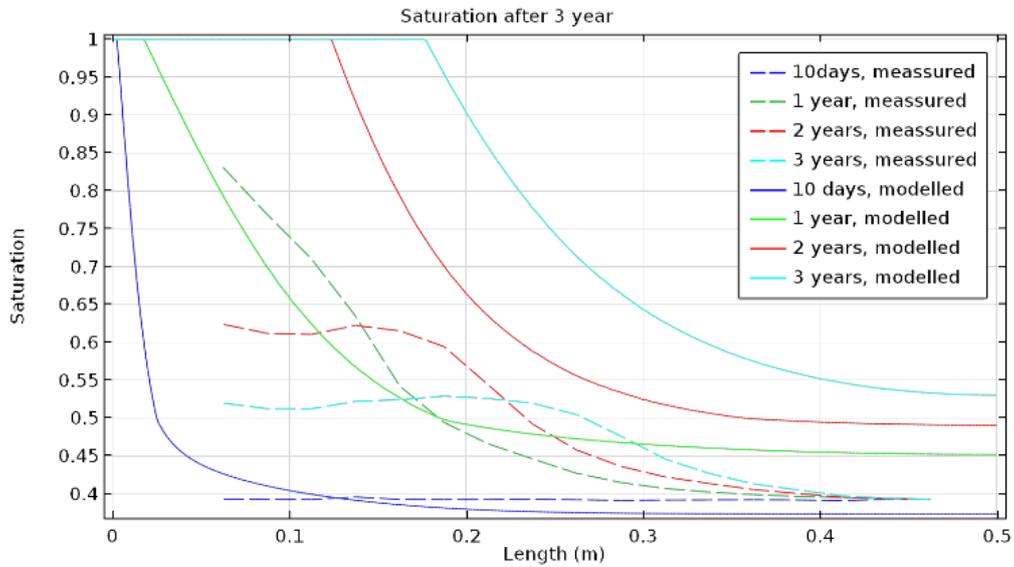


図 5.3.4-2 飽和プロファイルのモデル結果と試験結果の比較

(2) 温度の影響を考慮したケース

標準ケースでモデルのキャリブレーションを行った後、熱を考慮した解析を実施した。解析の結果、温度勾配が境界に向かって水を押し、温度勾配が高くなるほど飽和領域はより速く拡大する傾向を示した。しかし、飽和領域の勾配は不飽和領域の方が大きいため、温度勾配があるとした時の総水量は減少する結果となった (図 5.3.4-3)。

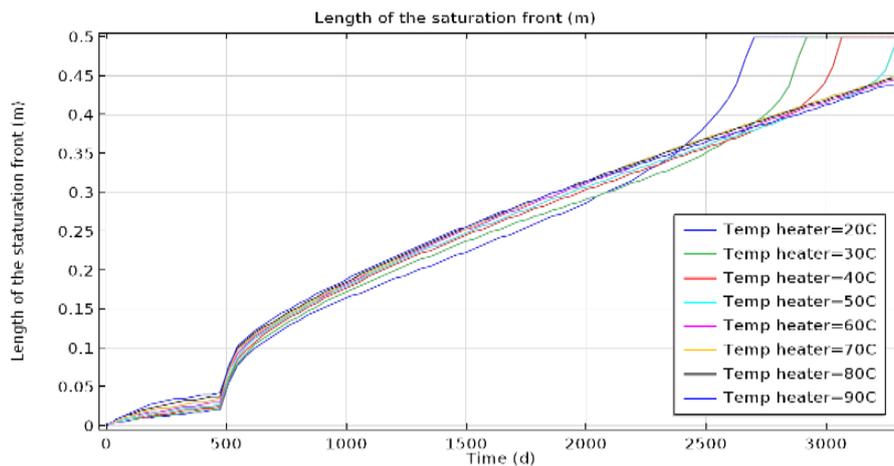


図 5.3.4-3 異なる温度による飽和フロントの位置

不飽和領域内における飽和プロファイルの挙動を理解するために、解析開始からの時間ごとの飽和プロファイルを図 5.3.4-4 に示した。これにより、ベントナイトの中心部にある熱源の温度が高くなった場合の飽和領域の広がり方の傾向がわかる。また、材料が熱源の近くで乾燥することにより、飽和度の勾配が大きくなる傾向も示された。

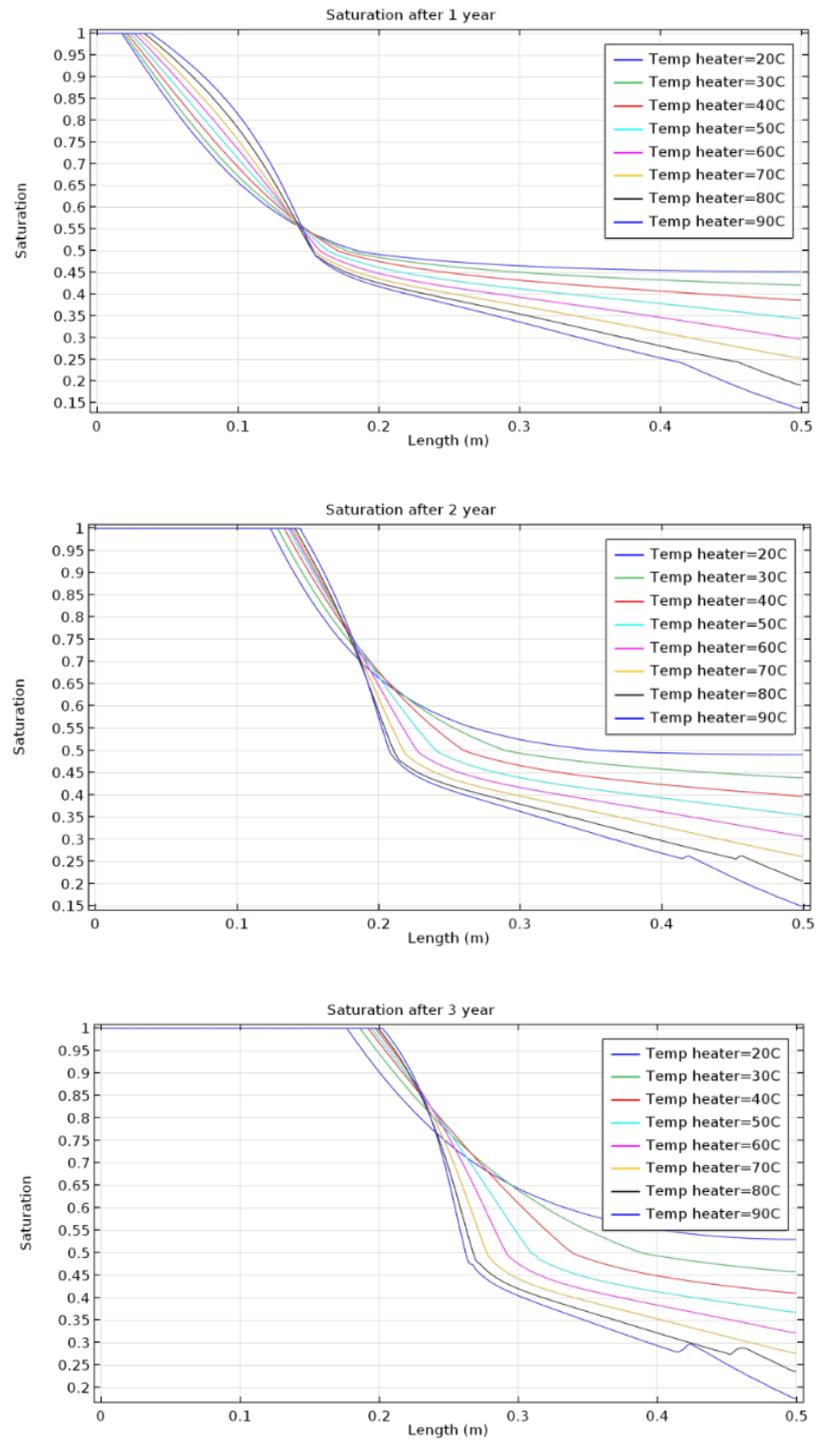


図 5.3.4-4 (a)-(c) 中央の温度が異なる時間に変化するときの飽和プロファイル
 ((a) 1年後、(b) 2年後、(c) 3年後)

(3) 閉鎖系での空気圧の予測

ここでは、空気が外部に排出されない閉鎖系をモデルとして、解析を行った。この系では、水が試験装置に注水されると、孔内の空気圧が上昇することを意味し、すべての間隙が互いに接続され、空気圧が試験全体で同じであるものとした。この時、空気は理想気体則（式 6.4-3）に従うものと仮定する。

$$pV = nRT \quad \text{式 5.3-3}$$

保持曲線は空気圧の上昇の影響を受ける。この影響を捕捉するために、サクシオンは、式 6.4-4 に従って追加された外部圧力を用いて粘土のポテンシャル（周囲圧力がないときのサクシオン）であると仮定する。

$$s = \psi + p_e \quad \text{式 5.3-4}$$

ここで、 s はサクシオン圧、 ψ は粘土のポテンシャル、 p_e は外圧である。

このモデルでは気相が水に溶解することは考慮されていないため、空気圧が上昇するにつれて圧力が過大評価される。空気圧が上昇して注水口の水压に近づくと、図 5.3.4-5 と図 5.3.4-6 に示すように水の流入が停止し、完全な飽和には達しない。実際の場合には、空気は水に溶解し、拡散によって移動し、最終的には供試体は飽和すると考えられる。

図 5.3.4-5 には、空気が水に溶解しないとした場合の間隙空気圧が示されている。実際の試験結果では、図 5.3.4-7 に示したように間隙空気圧の上昇は 1500 日経過時に約 3kPa の上昇であり、解析で得られている（図 5.3.4-5）計算値 300 kPa に比べ非常に低い。この結果からは水への空気の溶解量が多いことが推測される。また、図 5.3.4-6 に示したように、空気が系外に排出される場合（開放系）と排出されない場合（閉鎖系）の解析による結果と測定結果を比較する（図 5.3.4-6）と、1500 日までの結果は浸潤する水の量の測定データは開放系と閉鎖系の間に位置していた。この結果は、空気の水への溶解の影響だと解釈される。また、解析結果では開放系と閉鎖系の差は試験終了後の 1500 日以降に大きくなっているが、残念ながら、試験は上下から浸潤が中央付近まで進行し、浸潤フロントが上下で接触してしまったことにより試験を終了した。そのため、この結果についての検証はできなかった。

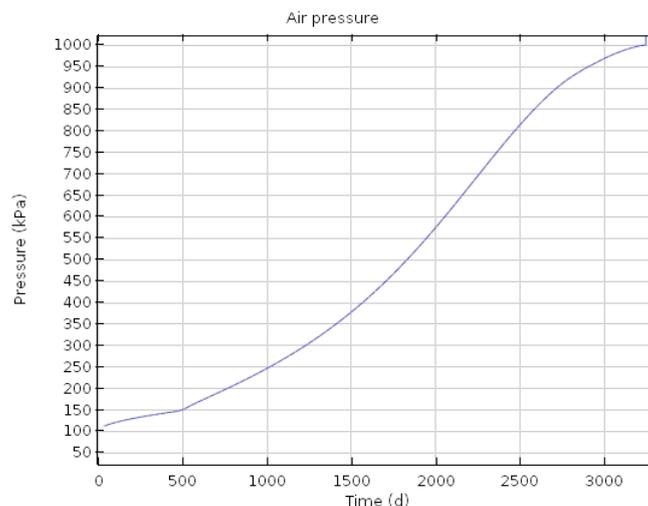


図 5.3.4-5 理想気体の状態方程式によりモデル化された間隙空気圧

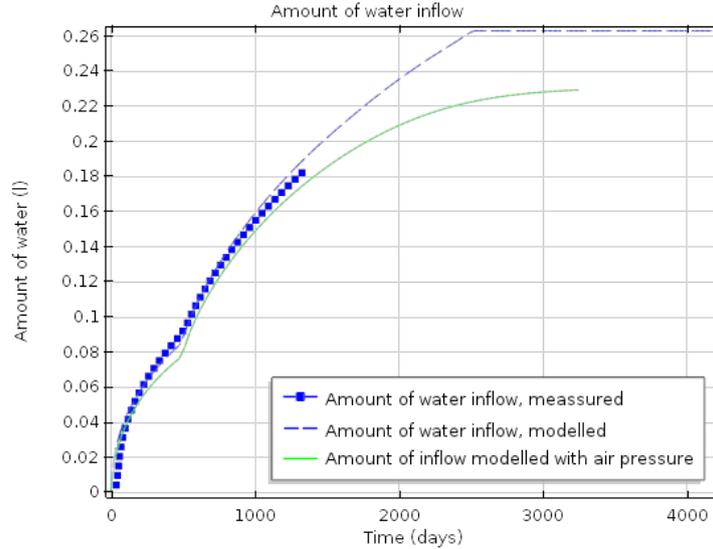


図 5.3.4-6 閉鎖系と開放系でのモデル化された水の流入量と試験データとの比較

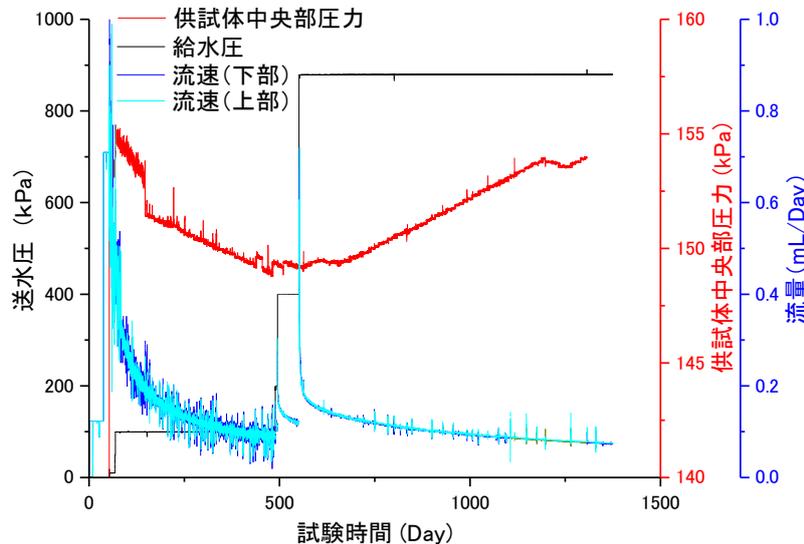


図 5.3.4-7 間隙空気圧と給水速度の経時変化

5.3.5 まとめ

平成 28 年度と今年度にかけて、本検討の中で行った一次元を模擬した浸潤試験の体系をモデル化して、解析ツール COMSOL を用いて再現解析を行った。昨年度行った一方向からの蒸留水の浸潤試験に関しては、系内の蒸気を考慮することにより浸潤フロント（含水比が 1% 上昇する地点）の進展を再現することができている。今年度は、上下 2 方向からの浸潤フロントの進展について、熱を考慮しない場合と考慮した場合についての解析による評価を行った。また、浸潤の際に空気が系外に逃げない場合（閉鎖系）にした場合の空気圧の上昇についても解析を行った。試験期間について、水の浸潤量は測定結果と解析結果は整合し、また、空気が浸潤する水に溶解することは解析では考慮していないが、試験結果には溶解が含まれることと矛盾しない結果とな

った。

これまでの試験と解析の結果により、一次元での浸潤挙動に関しては、解析的評価ができるものと考えることができる。また、それは今回の試験系が解析のモデルとして制御された試験系であったことをも意味する。今回の解析は考えるべき要素が考慮されていたことの検証となるため、今後、二次元、三次元の解析に進んでいくことができると考える。

第5章 参考文献

- [1] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成26年度地層処分技術調査等事業処分システム工学確証技術開発報告書（第2分冊）（2015）。
- [2] 岩谷隆文、城まゆみ、川久保政洋、石井智子、朝野英一：処分孔竖置き方式における緩衝材流出に関する検討（その1；研究計画）、土木学会第71回年次学術講演会、CS13-033、2016.
- [3] 原子力発電環境整備機構:セーフティケースに関する外部専門家ワークショップ資料、2016.
- [4] 原子力発電環境整備機構:地層処分事業の安全確保（2010年度版）～確かな技術による安全な地層処分の実現のために～、2011.
- [5] 原子力発電環境整備機構:放射性廃棄物の地層処分事業について（分冊－1）、2009.
- [6] SKB:RD&D Programme、2013.
- [7] 原環センター:平成17年度地層処分技術調査等報告書 高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発 遠隔操作技術高度化調査、2006.
- [8] 原環センター:平成26年度地層処分技術調査等 処分システム工学確証技術開発報告書（第2分冊）－人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材、2015.
- [9] Pattersson, S.:SKB R&D work on low-pH cementitious materials for a geological repository、2007.
- [10] Eriksson, M., Lindström, L.:KBS-3H post-grouting Mega-Packer test at -220m level at Äspö HRL、 SKB Report R-08-42、2015.
- [11] Hatanaka, K., Lim, Doo-Hyun and Ishii, E. : Geo-descriptive modeling of water conducting features characterized in sedimentary formations in Horonobe area of Japan、Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.1265、1265-AA-06-04、2010.
- [12] 鈴木俊一、本島貴之、井尻裕二、青木広臣：確率統計理論による亀裂特性データ相互関係の整理と数値解析モデルによる妥当性検証、土木学会論文集 C、Vol.65、No.1、pp.185-195、2009.
- [13] 日本原子力研究開発機構：幌延深地層研究計画 平成26年度調査研究成果報告、JAEA-Review2015-017、2015.
- [14] 日本原子力研究開発機構：幌延深地層研究計画 平成25年度調査研究成果報告、JAEA-Review2014-039、2014.
- [15] 核燃料サイクル開発機構:わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ、1999.
- [16] Olivella S、 Gens A、 Carrera J and Alonso EE.: Numerical formulation for a simulator (CODE BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. Eng Computations 13(7): 87-112 (1996).
- [17] A.Iizuka、 H.Ohta: A Determination Procedure of Input Parameters in Elastoviscoplastic Finite Element Analysis、 Soils & Foundations、 Vol.27、 No.3、

- pp.71-87 (1987).
- [18] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術人工バリア長期性能評価技術開発報告書（第 1 分冊）－人工バリアの長期挙動の評価－ (2012).
 - [19] (独)日本原子力研究開発機構：JAEA 緩衝材基本特製データベース、
<http://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/>
 - [20] Komine、 H. and Ogata、 N.、 New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials、 Canadian Geotechnical Journal、 Vol. 40、 No. 2、 pp. 460-475 (2003).
 - [21] Sasakura、 T. Kobayashi、 I.、 Sahara、 F.、 Murakami、 T.、 Ohi、 T.、 Mihara、 M. and Itoh、 H.： Studies on mechanical behavior of bentonite for development of elasto-plastic constitutive model、 International Conference on Radioactive Waste Disposal (DisTec 2004)、 pp.498-507 (2004).
 - [22] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 27 年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書（第 2 分冊） (2016)
 - [23] SKB 社：KBS-3H Complementary studies 2008–2010、 Technical Report TR-12-01 (2012).
 - [24] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書
 - [25] Åkesson M、 Börgesson L、 Kristensson O、 2010. SR-Site Data report. THM modelling of the buffer、 backfill and other system components. SKB TR-10-14、 Svensk Kärnbränslehantering AB.
 - [26] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 28 年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書（第 2 分冊） (2017)

第6章 緩衝材の設計に関する検討

(公財)原子力環境整備促進・資金管理センターで実施されている高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業では、人工バリア全体の設計・施工仕様の策定に関する調査・検討が行われており、その一環として緩衝材の品質・健全性を確保するための方策について検討が進められている。これまでに取り組んできた各種試験や検討ならびにわが国の特徴的な地下環境(湧水環境等)を踏まえ、平成28年度には緩衝材施工方法(緩衝材の設計や機能維持のための工学的対策など)に関する考え方の整理を行った。具体的には、緩衝材機能に係わる既往検討の文献調査により、緩衝材の設計及び施工の観点で最新情報を整理した。また、国内関連機関で取りまとめられた緩衝材の仕様を決定する方法やデータ整理の考え方・体系化方法を整理するとともに、SKBでまとめられている設計の考え方等も整理し、日本の考え方との違いについて考察を加えた。さらに、証拠に基づく意思決定支援理論(ESL)を活用し、緩衝材の設計に関する現状の技術レベルの概略評価を試みた。本業務では上記の検討を踏まえて、ベースとなる知見等の整理を行い、設計方法に関する提案を行う。

6.1 緩衝材の設計要件に関する知見の整理

原子力発電環境整備機構(以下、NUMO)が公表している緩衝材の設計方法[1](図6.1.1-1、表6.1.1-1参照)をふまえて、信頼性向上の観点から設計要件に関する整理を行う。また、新たな知見や各設計要件に影響を及ぼす要因等を加味して緩衝材の設計方法について検討する。さらに、緩衝材の仕様に関わる指標について考察を加える。

なお、検討にあたっては国外産の材料の適用や施工法の選択肢に対する柔軟性を考慮する。

表 6.1.1-1 緩衝材の設計要件 (NUMO、2016)

設計要件	方法	指標	基準
低透水性	緩衝材中の放射性物質の移行が拡散によって支配されるように、緩衝材の密度を設定する。	ペクレ数	0.1以下
自己シール性	施工時の隙間を充填可能な膨潤性を有していることを確認する。	膨潤率／隙間体積比	2以上
コロイドろ過能	コロイドが緩衝材中を透過しないように、緩衝材の密度を設定する。	コロイド透過率	0
微生物影響の防止	緩衝材内で微生物活動が生じないことを確認する。	菌体数	増殖しないこと
物理的緩衝性	オーバーパックの腐食膨張による影響を緩和できるように、緩衝材の密度と厚さを設定する。	緩衝材圧密反力と地下水静水圧の合計	オーバーパックの耐圧強度を下回り、急増しないこと
自己修復性	ガス発生等により亀裂が生じたとしても、閉塞可能な密度であることを確認する。	破過前後の透水係数の増加割合	1以下
製作施工性	緩衝材ブロックが製作可能な密度であることを確認する。	有効粘土密度	1.8Mg/m ³ 以下

 安全機能に関わる要件
 実現性に関わる要件

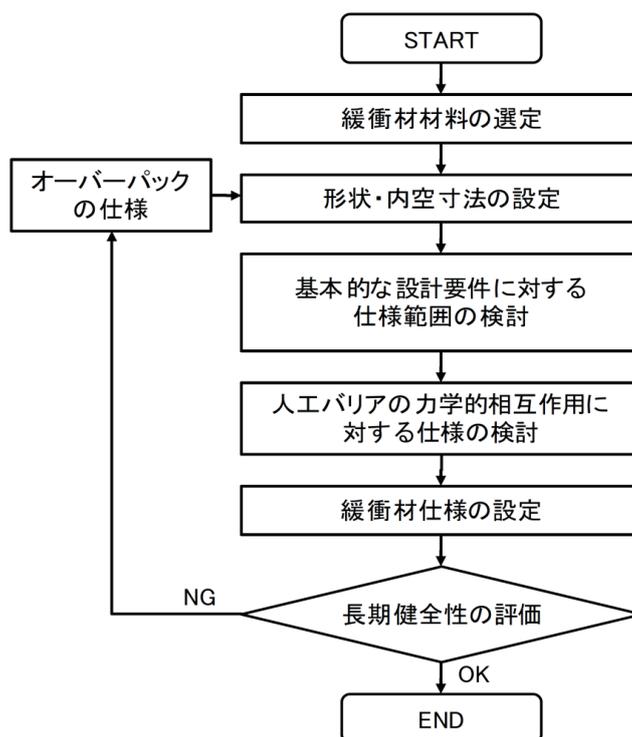


図 6.1.1-1 緩衝材の設計フロー (NUMO,2016)

ここでは、まず緩衝材の設計要件の関連性を整理した上で、最新の知見に基づく設計上の留意点を整理する。続いてこれらの設計要件や留意点をふまえた緩衝材の設計方法を検討し、最後に

設計指標等について検討する。以上の流れを図 6.1.1-2 に示す。

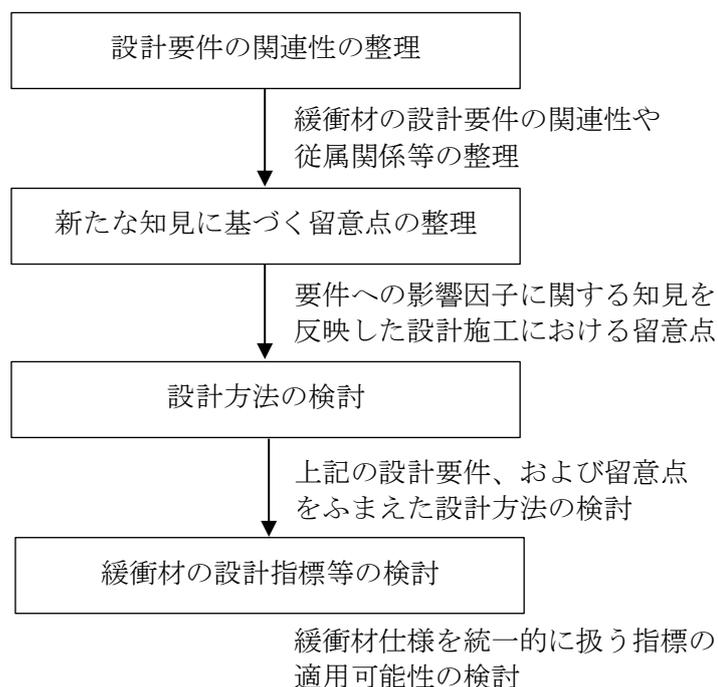


図 6.1.1-2 検討手順

本検討では、表 6.1.1-2 に示す処分方式および施工方法を対象とする。

表 6.1.1-2 検討対象とする処分方式および緩衝材の施工方法

処分方式	緩衝材の施工方法
処分孔縦置き式	ブロック
	ブロック+隙間充填ペレット
	吹付け（無人施工）
横置き PEM 式	撒き出し・締固め
	吹付け（有人施工）
	吹付け（無人施工）

処分孔縦置き式における緩衝材の施工は「ブロック式」、「ブロック+隙間充填ペレット」、「吹付け」とも遠隔操作による無人化施工である。横置き PEM 式における「撒き出し・締固め」は、PEM 鋼殻内に廃棄体定置用の型枠を設置し、緩衝材の撒き出し・締固めをした後に型枠内に廃棄体を定置することを想定する。横置き PEM 式における「吹付け（有人施工）」では同様の手順における緩衝材の施工を吹付けにより行うものであり、「吹付け（無人施工）」は、遠隔操作で廃棄体を PEM 鋼殻内にセットした後に緩衝材を吹き付ける手順を想定している。

6.1.1 設計要件に関する整理

NUMO が公表している緩衝材の設計要件は、それぞれが必ずしも独立したものでなく、相互の影響があるため、緩衝材に求められる機能をふまえてこれらの関連性や従属関係を整理する。ここでは、下記の内容について順次示す。

- ・ 緩衝材に求められる機能
- ・ 安全機能・要求機能への対応
- ・ 緩衝材の機能に関わる影響要因と影響事象の整理
- ・ オーバーパックの安全機能に基づく緩衝材の設計要件

(1) 緩衝材に求められる機能

緩衝材に求められる機能を表 6.1.1-1 に示す。ここでは、事業段階において処分場の構成要素に要求される「要求機能」と「安全機能」を分類して示した。

表 6.1.1-1 機能の定義

	定義
安全機能	安全の確保のために要求または期待する機能である。安全確保には、閉鎖後長期の安全確保と事業期間中の安全確保があるが、緩衝材に求められる安全機能は閉鎖後長期の安全性に関わる機能である。
要求機能	設計因子(処分場に持たせる性質や能力)から事業段階において構成要素に要求される機能のことである。建設・操業段階における緩衝材への要求機能としては工学的実現性の確保が求められている。

1) 安全機能

処分システムに求められる「隔離」「閉込め」から派生する安全機能と、これに対応する人工バリアの構成要素[1]を表 6.1.1-2 に示す。表 6.1.1-2 に示す通り、緩衝材には安全機能として「放射物質の移行抑制」に関わる下記の項目に対して十分な機能を有している事が求められる。

- ・ 放射性物質の溶解度制限
- ・ 移流による放射性物質の移行の抑制
- ・ コロイド移行の防止・抑制
- ・ 収着による放射性物質の移行遅延

なお、「放射性物質の溶解度制限」はサイトの地下水環境条件に大きく依存し処分システムの安全評価の中で総合的に評価される機能である。緩衝材の設計においては陽に考慮されないため、以降においては検討対象外とする。

表 6.1.1-2 処分システムに求められる安全機能と対応する構成要素 (NUMO-TR-11-01)

分類	安全機能		構成要素	
隔離	地質の長期的な変動からの防護		地質媒体	
	人の接近の抑制			
閉込め	放射性物質の浸出抑制	ガラスマトリクスによる浸出抑制	ガラス固化体	
		発熱が著しい期間の地下水接触の防止	オーバーパック	
	放射性物質の移行抑制	放射性物質の溶解度制限		地質媒体 緩衝材、オーバーパック
		移流による放射性物質の移行の抑制		地質媒体 緩衝材
		コロイド移行の防止・抑制		緩衝材
		収着による放射性物質の移行遅延		緩衝材 地質媒体
		分散による移行率の低減		地質媒体
		アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制		プラグ、埋戻し材

2) 要求機能

一方、長期安全性に関わる安全機能とは別に、緩衝材の工学的実現性（建設・操業時）に関わる要求機能として、下記の項目に対して十分な機能を有している事が求められる。

- ・製作／施工が可能であること
- ・遠隔による定置が可能であること
- ・幾何形状の維持（建設～操業段階）

(2) 安全機能・要求機能への対応

前述した安全機能・要求機能への対応としては、緩衝材の設計要件を設定して緩衝材の設計においてこれを満足する仕様（材料、厚さ、密度）を規定するものと、設定した仕様に対してこれが機能を満足することを照査または安全評価（評価項目）により確認するものに分けることができる。各機能の特徴を考慮したこれらへの対応を表 6.1.1-3 に示す。

例えば、「移流による放射性物質の移行の抑制」のための「低透水性」、「コロイド移行の防止・抑制」のための「コロイドろ過性」、および「施工可能であること」のための「製作施工性」は、各機能を満足するよう、緩衝材の設計（設計要件）においてその仕様を設定する。

一方、「収着による放射性物質の移行遅延」のための「収着性」は、設計された緩衝材を含め処分システム全体を対象とする安全評価（評価項目）において総合的に評価されるものであり、緩衝材単体を対象とする設計で仕様を規定するものではない。また、「幾何形状の維持」のための「支持性能」は、廃棄体の荷重条件も含め、人工バリアとして設定された仕様に対して緩衝材

の圧密沈下や力学的安定性が問題ないかを数値解析によるシミュレーションによって照査すること（評価項目）により総合的に確認するものであり、緩衝材単体を対象に仕様を決めるものではない。

表 6.1.1-3 緩衝材に求められる機能への対応

①安全機能／要求機能	①を満足する為に設定される設計要件または評価項目	対応	
		設計要件	評価項目
移流による放射性物質の移行の抑制	低透水性	○	
コロイド移行の防止・抑制	コロイドろ過性	○	
収着による放射性物質の移行遅延	収着性		○
施工可能であること	製作施工性	○	
幾何形状の維持	支持性能		○

(3) 緩衝材の機能に関わる影響要因と影響事象の整理

表 6.1.1-3 のうち放射性物質の移行抑制に対応する緩衝材の安全機能（移流による放射性物質の移行の抑制、コロイド移行の防止・抑制、収着による放射性物質の移行遅延）に関わる状態因子として、鉱物組成、間隙構造、厚さ、密度、温度、間隙水の水質が挙げられる。

また、要求機能の工学的実現性：「施工可能であること」に対応する「製作施工性」については、施工方法に応じて必要となる施工時の処分孔や廃棄体と緩衝材の間の「隙間」を考慮する必要がある。支持性能は、廃棄体オーバーパックを力学的に支持し沈下を防止する性能である。

これらの緩衝材の状態に影響を及ぼす可能性のある事象または因子として、以下が挙げられる。これらの項目は、既往検討[3]を参考に、緩衝材の機能への影響を整理する中で抽出した。

- ・ OP の腐食や放射線分解によるガス
- ・ セメント系材料の Ca 成分溶出に伴う Ca 型化
- ・ 緩衝材敷設時の隙間
- ・ 速い地下水流によるパイピング／浸食
- ・ 長期荷重（OP の腐食膨張、岩盤クリープ）
- ・ 地震動
- ・ 人工バリア周辺の残置物
- ・ 廃棄体の発熱
- ・ 放射線損傷
- ・ 地下水の酸化還元状態
- ・ 地下水を介した地球化学反応（高アルカリ成分による鉱物溶解等）

・地下水組成

緩衝材の要求機能・安全機能に対する影響要因の整理結果を表 6.1.1-4～表 6.1.1-5 に示す。

表 6.1.1-4 緩衝材の要求機能／安全機能に対する影響要因（1/2）

要求機能／安全機能	要求機能／安全機能への影響に関する分析		
	影響要因	要因の所在	影響事象
施工可能であること（製作性/遠隔操作による施工性）	なし	—	—
幾何形状の維持（支持性能）	なし	—	—
移流による移行の抑制	ガス	OP 緩衝材	OP の腐食、放射線分解、または微生物活動によるガス発生 →緩衝材の破過 →緩衝材中に高透水経路発生
	Ca 成分	支保インバート	セメント系材料からの Ca 成分溶出によるベントナイトの Ca 型化 →膨潤性低下 →緩衝材の変形挙動への影響 →密度低下による透水性増大
	敷設時の隙間	緩衝材	隙間の影響による透水性増大
	速い地下水流	地下水	地下水による緩衝材の流出 →密度低下による透水性増大
	長期荷重	岩盤金属材料	長期的な外荷重による変形 →緩衝材の変形挙動への影響 →密度低下による透水性増大
	地震動	岩盤	地震動（繰り返し）の作用 →密度低下による透水性増大
	残置物	支保 PEM 容器	金属材料との化学反応（Fe 型化） →膨潤性低下 →緩衝材の変形挙動への影響 →密度低下による透水性増大
	地球化学反応	緩衝材	鉱物組成の変化 →間隙率、間隙構造の変化 →密度の変化 →間隙水の水質が変化
	地下水組成	サイト条件	地下水組成の変化 →膨潤性、透水性等の物性変化

表 6.1.1-5 緩衝材の要求機能／安全機能に対する影響要因 (2/2)

要求機能／安全機能	要求機能／安全機能への影響に関する分析		
	影響要因	要因の所在	影響事象
コロイド移行の防止・抑制	Ca 成分	支保インバート	セメント系材料からのCa成分溶出によるベントナイトのCa型化 →膨潤性低下 →緩衝材の変形挙動への影響 →密度低下による透水性増大
	敷設時の隙間	緩衝材	隙間の影響による透水性増大
	速い地下水流	地下水	地下水による緩衝材の流出 →密度低下による透水性増大
	長期荷重	岩盤 金属材料	長期的な外荷重による変形 →緩衝材の変形挙動への影響 →密度低下による透水性増大
	地震動	岩盤	地震動（繰り返し）の作用 →密度低下による透水性増大
	残置物	支保 PEM 容器	金属材料との化学反応 →膨潤性低下 →緩衝材の変形挙動への影響 →密度低下による透水性増大
	地球化学反応	緩衝材	鉱物組成の変化 →間隙率、間隙構造の変化 →密度の変化 →間隙水の水質が変化
収着による放射性物質の移行遅延	熱	廃棄体	熱変質による収着性低下
	放射線	OP	放射線損傷による緩衝材の変質 →収着性低下
	残置物	支保 PEM 容器	金属との化学反応によるベントナイトの鉄型化等 →収着性低下
	酸化性の地下水	地下水	酸化性雰囲気中の地下水の流入 →収着性低下
	地球化学反応	緩衝材	鉱物組成の変化 →間隙率、間隙構造の変化 →密度の変化 →間隙水の水質が変化

上記の安全機能及び要求機能に対する各影響要因について、これらに対する現状の知見と設計上の対応を以下に示す。なお、対応方法としては、設計要件をたてて緩衝材の仕様設定で対応するものと、評価項目を設定して照査あるいは安全評価で対応する（照査や安全評価で機能上問題ないことを確認する）ものとに分けた。

- 腐食等によるガス

オーバーパック（以下「OP」とも表記）の腐食、放射線分解ガス、微生物活動等により生成されるガスが人工バリア内部で発生して蓄積し、破過することで水みちが形成されることが懸念される。そこで、これらのガス発生にともなって緩衝材中にひび割れ目が生じても、その膨潤性により「自己修復」する性能をもたせることとし、設計要件として「施工後に水みちが生じた場合、自己修復に必要な膨潤圧または膨潤ひずみ量が確保されること（自己修復性）」を設定する。

なお、ガスによる放射性核種の移行挙動への影響を安全評価において検討し、それらの結果として安全評価上優位な影響があると考えられる場合は、その影響の低減策を検討する必要がある。

- Ca型化

セメント系材料から溶出するカルシウム成分によりベントナイトがCa型化し、緩衝材の膨潤性能の低下や低透水性の機能が低下することが懸念される。Ca型化の影響については、取得されているCa型化ベントナイトの試験データを用いることにより直接設計に反映することとする。

- 施工時の隙間

緩衝材の施工時に必要な隙間（OP～緩衝材の間、緩衝材～岩盤の間）の存在により、緩衝材が飽和後も局所的に低密度の領域が存在することが懸念される。また、万一の想定外事象として、緩衝材の製作・施工不良によりベントナイトブロック内に隙間が生じる可能性も考えられる。

緩衝材の膨潤量に対して施工時の隙間が大きく、閉鎖後長期においても隙間が残存し、移行経路となることが懸念される。そこで、緩衝材の敷設時に生じる隙間については、緩衝材自身に自己シール性をもたせることによつて安全機能への有意な影響が生じないようにする。すなわち、緩衝材に自己シール機能をもたせることとし、設計要件として「施工時に生じる隙間を膨潤変形により充填するために必要な膨潤ひずみ量を確保すること（自己シール性）」を設定して設計で対応する。

なお、施工時に密度の異なる緩衝材が隣接する場合、再冠水により膨潤すると基本的に緩衝材は均質化する方向にむかうと考えられるが、既往研究（例えば小林ほか、2010[4]）によれば、完全に均質化することはなく膨潤圧が釣り合う応力状態で変形が止まるという解釈が得られている。このような緩衝材密度の不均一性に関する知見をふまえて設計施工への留意点を整理する必要がある。

- 地下水による緩衝材の流出（パイピング・エロージョン）

地下水流速が大きい等の母岩条件により、緩衝材が周辺母岩に流出して密度低下を生じ、緩衝

材のバリア機能が損なわれる可能性が懸念される。これについては、まず候補母岩の選定において「核種移行時間や緩衝材の機能に及ぼす影響が小さい地下水理特性を有する地層を選定する」こと、許容湧水量を設定してこれを満足する位置に廃棄体を定置する（操業時に処分孔毎に湧水量の状況に応じて定置の可否を判断する）といった対応が考えられる。緩衝材の設計においては、各設計要件に対し、浸食量を考慮した余裕代を見込むことで対応する。なお、湧水に対してはグラウト等による工学的対策によって湧水量を低減することも考えられる。

なお、パイピングとそれに伴う緩衝材の流出については、既往の試験結果（小林ほか、2014[5]）をふまえ、設計施工への留意点を整理する必要がある。

- 長期荷重（岩盤クリープ、OPの腐食膨張）

OPの腐食膨張や岩盤からの応力によって緩衝材の厚さや密度が変わる可能性がある。また、岩盤クリープ変形及び金属材料の腐食膨張に伴う長期的な外荷重により、緩衝材がせん断変形して緩衝材中にひび割れが生じる可能性が考えられる。このような事象に対して、緩衝材が長期力学的な安定性を有することを解析的評価により確認する。

- 地震動

人工バリア定置後、地震動によって受ける応力により、緩衝材の力学的健全性が失われ、その内部で発生する応力や地圧等により当初の形状等を維持できなくなる可能性が懸念される。このような力学的な変化について、緩衝材の評価項目として「閉鎖後長期に想定される地震動に対して構造が健全であること（耐震性）」を設定し、処分施設に作用する地震動の影響を考慮して照査を行う。

- 人工バリア周辺の残置物

支保やPEM容器など、残置される材料（残置物）の影響として、例えば鋼材によってベントナイトが鉄型化し、その空隙構造が変化することによって間隙率が増加し低透水性等の安全機能が低下することが懸念される。このような可能性に対して、安全評価解析の一環（状態設定）として実施される地球化学解析により「残置物による変質・劣化の程度を解析評価すること（残置物の影響評価）」により、性能への影響が問題ないことを確認する。

- 廃棄体の発熱

廃棄体の発熱の影響によって、緩衝材の温度が上昇し熱変質（イライト化）を生じて収着性が低下する可能性が懸念される。これに対しては、地下施設の設置深度の設定、およびレイアウト設計において「合理的な廃棄体占有面積で緩衝材の温度上昇を制限温度（100℃）以下に抑えること」で対応する。

また、緩衝材の温度上昇を軽減するという観点からは、熱伝導性の良好な材料を選択することが有効であると考えられ、材料選定において留意することが好ましい。

- 放射線損傷

廃棄体からの放射線によって緩衝材の構造が変質し、緩衝材の膨潤・圧密特性、及び収着性能が変化することが懸念される。このように廃棄体からの放射線によって緩衝材が変質する可能性については、緩衝材の材料選定により、放射線影響を受けにくい材料を採用する方針をとる。ただし、ベントナイトに対する既往研究によると、放射線損傷による構造変質は非常にわずかであると予想されており[6]、緩衝材の設計においては特段考慮しない。

- 地下水の酸化還元状態

母岩の地下水が酸化性雰囲気の場合、緩衝材の間隙水も酸化性となり、その収着性が小さくなるなど核種移行特性への影響が懸念される。この影響については、候補母岩の選定において、「人工バリアの腐食・変質や核種移行特性に及ぼす影響が小さい地化学特性を有する地層を選定する（化学環境）」を要件として対応する。

- 地下水を介した地球化学反応

セメント系材料から溶出するアルカリ成分等の影響により、緩衝材の溶解・変質が進み、その安全機能を低下させることが懸念される。ただしその安全機能を低下させる指標（pH等）の閾値は明確ではない。この影響に対しては、安全評価解析の一環（状態設定）として実施される地球化学解析により「変質・劣化の程度を解析評価すること」で性能への影響が問題ないことを確認する。評価の結果によっては、緩衝材の仕様の見直しや緩衝材が著しい溶解や変質を受けないよう、例えば低アルカリ性セメントを適用するなど、対応を検討することとなる。

- 地下水組成

地下水組成が変化すると、これに伴って緩衝材の膨潤性や低透水性等の物性が変化するため、緩衝材の設計においては地下水組成の変化を見込んでおく必要がある。

以上の影響要因に対する対応方針を以下に整理する。

表 6.1.1-6 影響要因への対応方針

＜緩衝材の設計で対応＞	
影響要因	設計要件
腐食等によるガス	自己修復性
Ca 成分	製作施工性以外の各設計要件
地下水組成	製作施工性以外の各設計要件
敷設時の隙間	自己シール性
地下水による緩衝材の流出	製作施工性以外の各設計要件 (浸食を考慮した余裕代を見込む)
＜照査で対応＞	
影響要因	評価項目
長期荷重 (岩盤クリープ、OP の腐食膨張)	長期力学挙動
地震動	耐震性
＜安全評価で対応＞	
影響要因	対応
人工バリア周辺の残置物	安全評価において影響が問題ないことを確認
地下水を介した地球化学反応	
＜その他＞	
影響要因	対応
廃棄体の発熱	緩衝材の温度上昇抑制 (処分深度選定、坑道仕様、レイアウトの設計)
地下水の酸化還元状態	化学環境 (母岩選定)
速い地下水流 (パイピング/浸食)	水理環境 (母岩選定) 工学的対策

(4) オーバーパックの安全機能に基づく緩衝材の設計要件

緩衝材の設計においては、緩衝材以外の処分システム構成要素（具体的にはオーバーパック）から求められる要件を考慮する必要がある。

オーバーパックの安全機能の一つに「放射性物質の浸出抑制（核種の閉込め）」が挙げられ、この機能を充足するための設計要件は「閉鎖後の構造健全性」である。オーバーパックの構造健全性は、その応力と腐食挙動に関連し、それぞれ緩衝材と以下の関係がある。

- ・オーバーパックの応力：オーバーパックの腐食膨張に起因する緩衝材からの圧密反力
- ・オーバーパックの腐食：緩衝材中の微生物活動による腐食挙動への影響

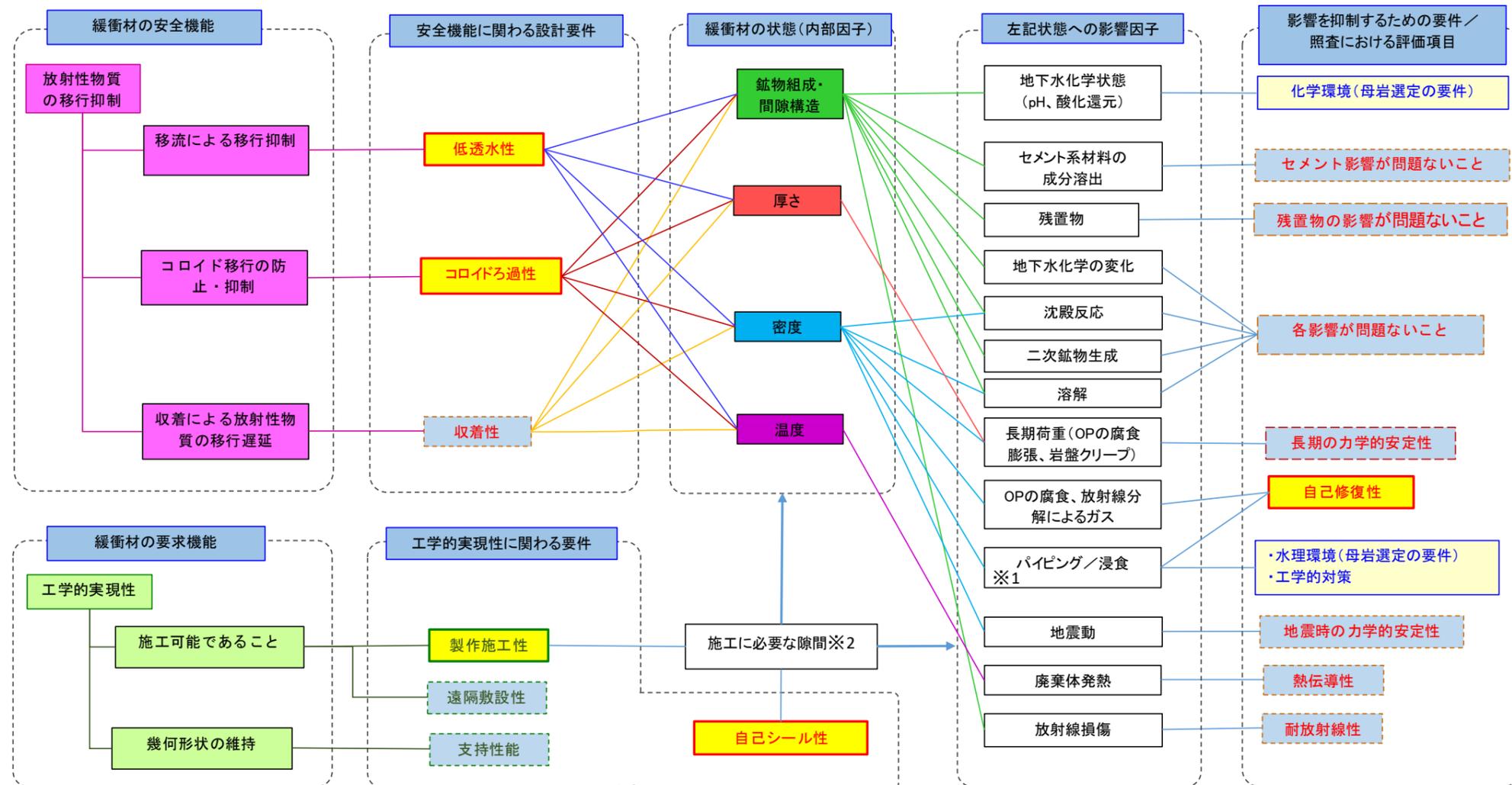
前者については、オーバーパックの腐食膨張（および岩盤クリープ）によって緩衝材からの反力が増大し、オーバーパックを破損させることが懸念される。これに対して緩衝材の設計要件として「**物理的緩衝性**」を考慮し、オーバーパックの構造健全性を確保する。

後者については、オーバーパックの腐食挙動に影響を及ぼすような微生物活動を生じないように緩衝材の設計要件として「**微生物影響の防止**」を考慮する。

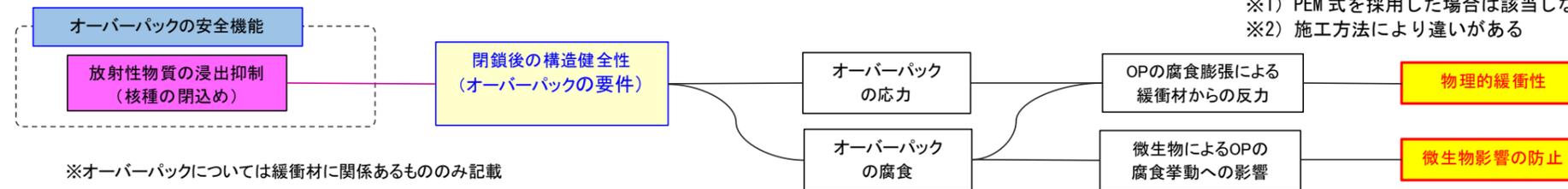
(5) 設計要件と影響因子の関係性の整理

以上の検討結果として、緩衝材の設計要件と影響因子の関係を図 6.1.1-1 に示す。図 6.1.1-1 は、想定する処分方式や施工方法で概ね共通であるが、図中の「影響因子」に関しては以下の点が相違する。

- ・PEMを採用した場合、影響事象としてパイピングが該当しない
- ・施工に必要な隙間は、施工方法によって異なる



※1) PEM式を採用した場合は該当しないと想定
 ※2) 施工方法により違いがある



※オーバーバックについては緩衝材に関係あるもののみ記載

- 凡例**
- : 安全機能(長期安全性の観点から求められる機能)
 - : 要求機能(工学的実現性の観点から求められる機能)
 - 赤字 : 安全機能に関わる緩衝材の設計要件
 - 赤字 : 安全機能に関わる緩衝材の評価項目であり、照査等により問題ないことを確認
 - 緑字 : 要求機能に関わる緩衝材の設計要件
 - 緑字 : 要求機能に関わる緩衝材の評価項目であり、照査等により問題ないことを確認
 - 青字 : 緩衝材以外の処分システム構成要素に対する設計要件
 - 青字 : 緩衝材の設計以外で対応

図 6.1.1-1 緩衝材の設計要件の関連性の整理 (処分孔縦置き・ブロック式の例)

図 6.1.1-1 の整理から、緩衝材の設計要件を表 6.1.1-7 に示す。

表 6.1.1-7 再抽出した緩衝材の設計要件

	項目	説明
設計要件	低透水性	緩衝材中の放射性物質の移行が拡散によって支配されること
	コロイドろ過性	コロイドが緩衝材中を透過しないこと
	製作施工性	緩衝材の製作・施工が可能であること
	自己修復性	ガス発生等により緩衝材中に亀裂が生じたとしても、閉塞が可能な膨潤性を有すること
	自己シール性	施工時の隙間を充填可能な膨潤性を有すること
	物理的緩衝性	オーバーパックの腐食膨張による応力を緩和すること
	微生物影響の防止	緩衝材内で微生物活動が生じないと考えられる仕様とすること

表 6.1.1-7 に示す通り、抽出された緩衝材の設計要件は、「低透水性」、「コロイドろ過性」、「製作施工性」、「自己修復性」、「自己シール性」、「物理的緩衝性」、「微生物影響の防止」であり、NUMO の設計要件と同様である。

ただし、図 6.1.1-1 の整理により、各設計要件の位置付けは横並びではなく、その関連性や従属関係（図 6.1.1-2 参照）が明らかになった。すなわち、放射性物質の移行抑制に関わる安全機能を直接的に満足するための「低透水性」および「コロイドろ過性」が上位に位置付けられ、それらに従属する要件として膨潤性に関わる「自己修復性」および「自己シール性」が位置付けられる。また、「製作施工性」は工学的実現性を満足させるための上位の要件であり、「物理的緩衝性」「微生物影響の防止」は、オーバーパックの設計要件である構造健全性を従属するための従属的な要件に位置付けられる。

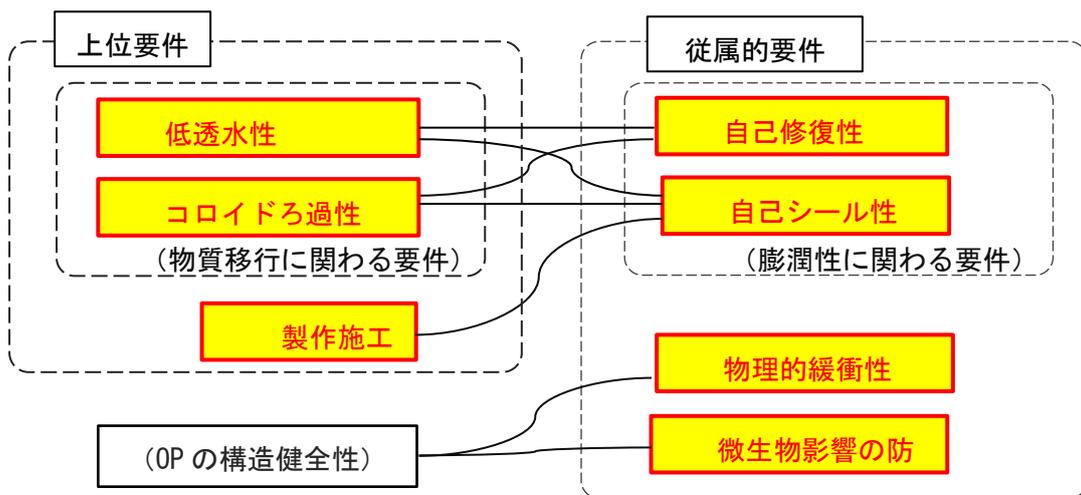


図 6.1.1-2 設計要件の関連性

(6) 新たな知見に基づく設計上の留意点の整理

(5)で整理した緩衝材の機能への影響事象に関する現状の知見をふまえると、既往検討において必ずしも明示的に取り扱われてこなかった緩衝材の設計上の留意事項として、表 6.1.1-8 に示す点が挙げられる。

表 6.1.1-8 本検討で着目する設計要件への影響因子と知見

影響事象	留意事項	関連する設計要件
施工時の隙間	施工時の隙間に起因した再冠水後の残留密度差	低透水性、自己シール性
地下水による緩衝材の流出	再冠水過程におけるエロージョンの発生条件と発生量	製作施工性を除く各設計要件

なお、施工時の隙間に対する「自己シール性」は、施工方法や施工誤差に応じて決まる隙間の大きさに対して、隙間を充填できるように緩衝材の仕様を設定するための要件である。設計において留意すべきは、隙間が充填された後の残留密度差による緩衝材機能（低透水性）への影響であると考えられる。

地下水による緩衝材の流出については、基本的に処分孔縦置き式を対象として想定する。緩衝材が鋼製容器に納められた PEM 横置き式の場合は、鋼製容器の寿命（健全な期間）をどの程度見込むか等によって考え方を整理する必要がある。

上記 2 点に関わる知見を以下に示す。

1) 施工時の隙間に起因した再冠水後の残留密度差

小林ほか（2010）[4]では、密度の異なるベントナイト材料の直列膨潤量試験による均質化過程の定量評価により、ベントナイトは均質化することなく、膨潤圧が釣合う応力状態で膨潤変形は止まるという解釈が示されている。

試験に用いられた直列膨潤圧試験機を図 6.1.1-3 に示す。試験に使用された材料はクニゲル V1 にケイ砂を 30wt% 加えたベントナイト混合土であり、高密度側の乾燥密度は約 2.0Mg/m³、低密度側の乾燥密度は約 1.2Mg/m³ で、両供試体の形状は等しい(φ 60mm×h20mm)。試験の結果として図 6.1.1-4 に示される両供試体の密度変化から、80 日以降はほとんど変形が生じていない。図 6.1.1-5 は、笹倉他（2004）[7]がクニゲル V1 単体で取得した e-logP 関係に試験結果をプロットしたものである。試験初期の低密度供試体の応力状態は図中の●（ピンクの丸）、高密度供試体は●（青い丸）であり、どちらも正規圧密線上にある。図 6.1.1-4 に示した試験後の乾燥密度から、高密度供試体は膨潤して密度を下げながら膨潤線を図中●（青い丸）→●（水色の丸）に至る。一方、低密度供試体は、高密度供試体に圧縮されて正規圧密線を●（ピンクの丸）→●（薄ピンクの丸）まで移動する。この時、試験後の乾燥密度●（薄ピンクの丸）と●（水色の丸）の応力（横軸）がほぼ同じ値で釣合っている点、また、この釣合っている応力が図中の赤線で示

したロードセルの読み値から通水圧を相殺した値とほぼ同等であることに着目すると、図 6.1.1-4 に示される残留密度差は、応力が釣り合い、膨潤変形が止まったものと考えられることを示唆している。

以上の知見から、施工時に隙間がある場合、ある状況を想定すると膨潤後の緩衝材に密度差の生じることが懸念される。従来の設計検討では膨潤後の緩衝材は均質一様であると仮定しているため、この残留密度差が生じる可能性と緩衝材の機能に与える影響について検討する必要がある。

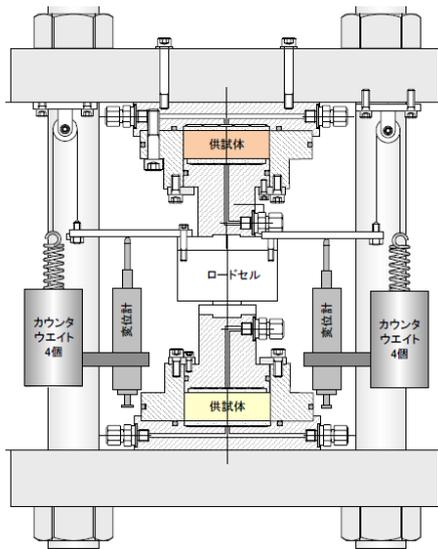


図 6.1.1-3 直列膨潤圧試験機
(小林ほか、2010)

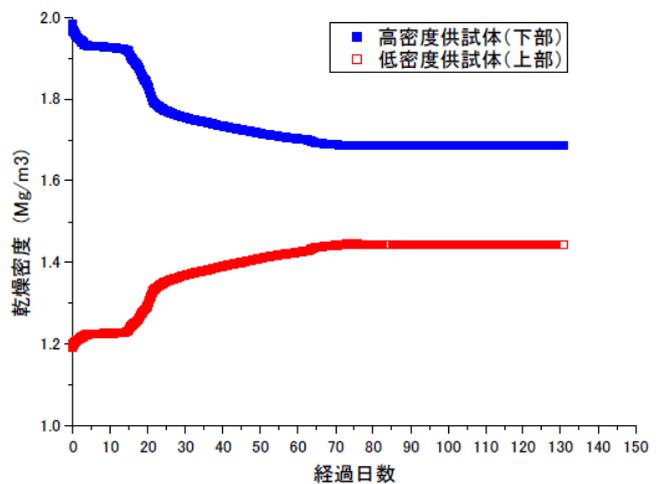


図 6.1.1-4 直列膨潤圧試験結果
(小林ほか、2010)

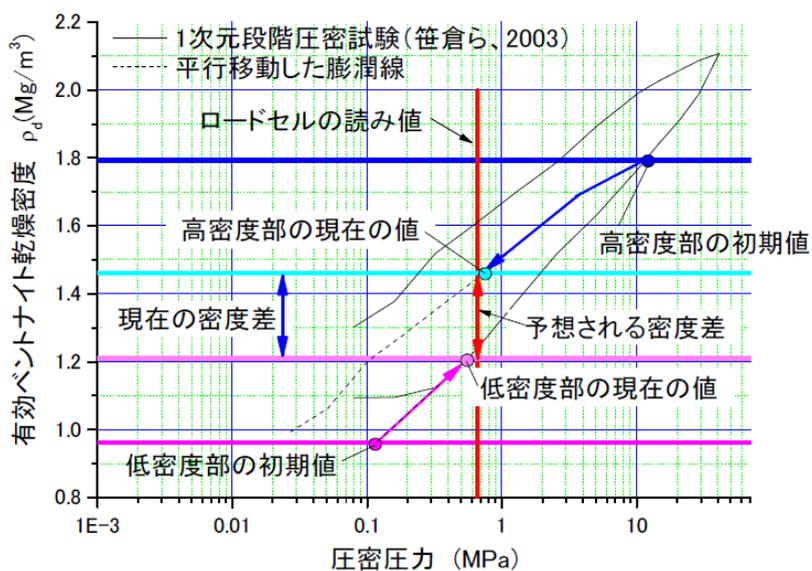


図 6.1.1-5 残留密度分布の力学的解釈 (小林ほか、2010)

2) 再冠水過程におけるエロージョンの発生条件と発生量

竹内ほか (2013) [8]では、処分孔への地下水の浸入による水みち形成 (パイピング) および浸食 (エロージョン) 挙動によるベントナイトの自己修復作用への影響を調べるため、小規模試験および長尺試験が行われている。図 6.1.1-6 に小規模試験、長尺試験各々の概念図を示す。通水は底面給水、上面排水である。小規模試験では、ブロック供試体 (ケイ砂 30wt%混合ベントナイト、乾燥密度 1.6Mg/m^3) に人為的に複数の水みちを設け、蒸留水 (0.1 l/分) を通水することにより、水みちの収斂状況を観察し、ブロックとペレットを合わせた供試体の観察により、水みちの収斂する位置が確認された。長尺試験では、ブロック供試体に 0.5M の NaCl 溶液を通水し、流量を調整しながらパイピングの発生状況が観察された。小規模試験の結果は以下の通りとされている。

水みちは通水開始時には複数存在していても、最終的には 1 本の大きな水みちに収斂し、緩衝材と非膨潤性材料(セル)の界面に形成された。ブロックとペレットが共存した場合には、ペレットとセルの界面に形成された。

- 流量一定条件での水みちが閉塞される流量は 0.001L/min であった。なお、大きく湾曲した水みちが形成されたことから、水みちが形成されるのは約 0.005L/min 以上からであることが推察された。
- 0.1L/min の場合、27 日でベントナイト (クニゲル V1) の全量が流出した。水の流量とエロージョン量の関係を SKB による MX80 のデータと比較すると、クニゲル V1 は、同一流量時のエロージョン質量が少なくエロージョンしにくい材料であることがわかった。
- 長尺試験の結果より、パイピングの状況は小規模試験同様であった。ただし、水みちにケイ砂が堆積し、 0.00001L/min でも自己修復しなかった。

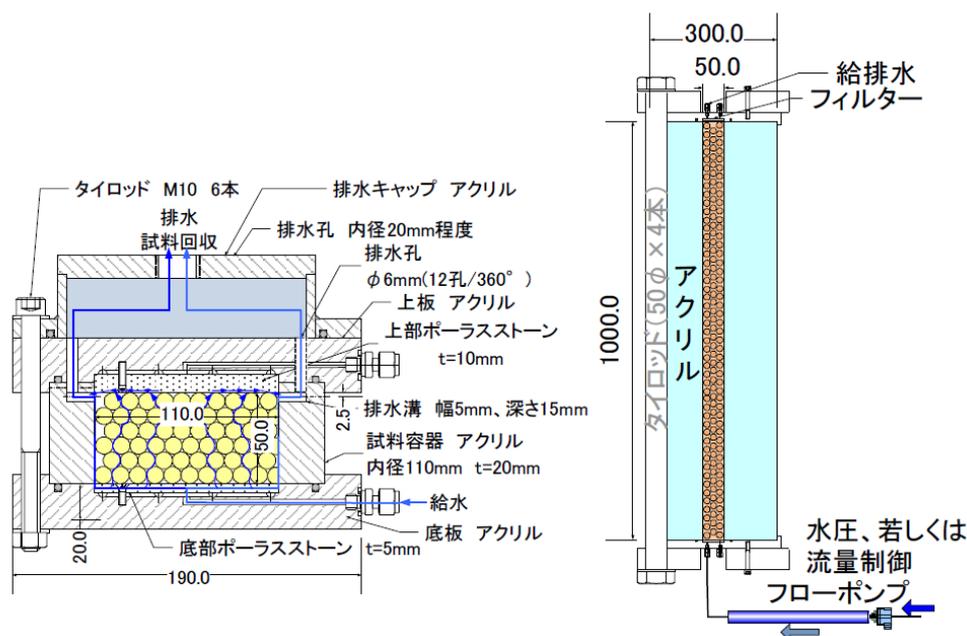


図 6.1.1-6 試験概念図(左：小規模試験、右：長尺試験) (竹内ほか、2013)

また、小林ほか (2014) [5]では、緩衝材のパイピングとエロージョン現象に関する試験が行われ、エロージョン質量と地下水総流量の関係が整理されている (図 6.1.1-7)。図 6.1.1-7 から、通水液の種類ごとにエロージョン質量と総流量の関係が平行と見なせること、モンモリロナイト含有率が高い方がエロージョンし易い傾向、イオン強度が高い方がエロージョンし易いことが分かったとされている。

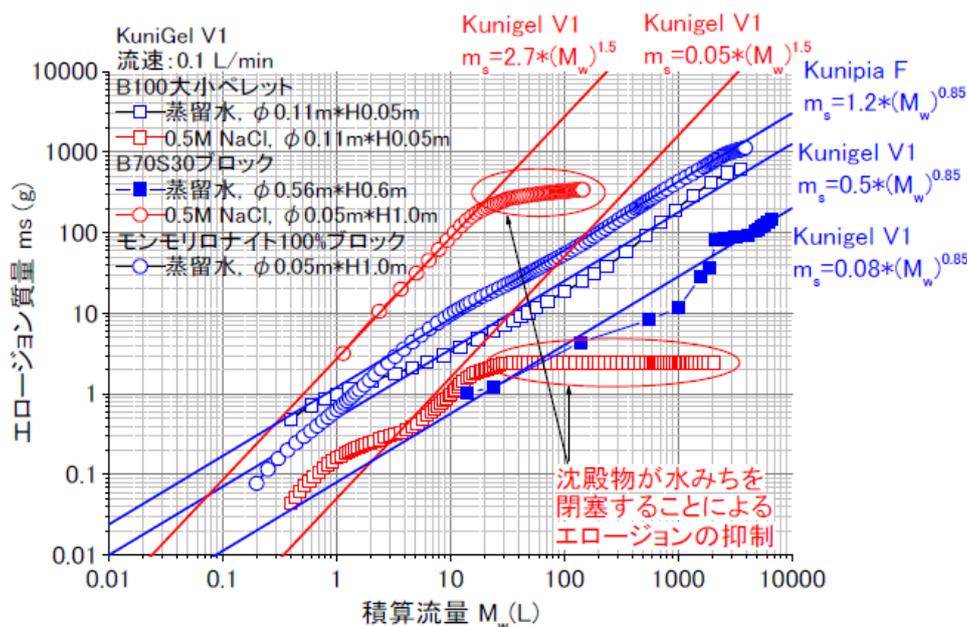


図 6.1.1-7 エロージョン質量と総流量の関係 (小林ほか、2014)

再冠水過程における緩衝材の流出は施工時に対して密度の低下を招くことから、膨潤後の緩衝材の長期性能への影響を勘案して、上記の知見を設計上の取扱いに反映すべきと考えられる。

6.1.2 設計方法の検討

(1) 設計要件に対応する仕様範囲の設定方法

6.1.1 において整理及び検討を行った内容を基に新たに設計方法の検討を行う。6.1.1(5)で抽出した設計要件を充足するための設計上の指標、および緩衝材の仕様の設定方法を表 6.1.2-1 に示す。

表 6.1.2-1 設計要件を充足する緩衝材の仕様の設定方法

設計要件	指標	仕様の設定方法	
低透水性	ペクレ数	ペクレ数が 1 より十分小さくなるよう膨潤後の緩衝材の透水係数を設定し、対応する密度の下限值を設定	
コロイドろ過性	コロイド透過率	試験結果に基づき、コロイドが緩衝材を透過しないよう（コロイド透過率=0）、膨潤後の密度の下限值を設定	
	自己シール性	緩衝材の膨潤量 ≥ 施工時の隙間 体積	隙間の大きさに対して、緩衝材の膨潤量が余裕をもって充てんできる密度と厚さを設定
	自己修復性	亀裂の閉塞性	亀裂が生じても緩衝材の膨潤により閉塞が可能な密度の下限值を設定
製作施工性	施工可能な密度	施工試験に基づき、施工可能な密度の上限値を設定	
	応力緩衝性		有効粘土密度と圧密応力の関係式から求められる OP への圧密反力が、静水圧等 OP に作用する荷重と合わせ、OP の耐圧強度を下回るように膨潤後の密度と厚さを設定
	微生物影響の防止		試験結果に基づき、微生物影響を防止可能（増殖率=0）な膨潤後の密度の下限值を設定

以下、各要件に関して具体的に説明を加える。

1) 低透水性

a 透水性に関する指標および基準

緩衝材中の核種移行が拡散支配となるように、サイト条件に応じた緩衝材中の地下水流速が十分小さくなるよう緩衝材の仕様を設定する。

表 6.1.2-2 低透水性に対する指標および基準（案）

設計要件	指標	基準
低透水性	ペクレ数	0.1 以下

緩衝材中の核種移行が拡散支配となることの確認は次式で表されるペクレ数を指標とする。

$$P_e = \frac{v \cdot L}{D_e}$$

ここに、 v ：緩衝材中の地下水流速[m/s]、 L ：緩衝材の代表長さ（緩衝材の厚さ）[m]、 D_e ：緩衝材中の実効拡散係数[m²/s]である。ペクレ数は、上式に示すように、移流効果（右辺の分子）と拡散効果（右辺の分母）の比で表される無次元数であり、拡散効果が移流効果より大きければ

1 より小さくなる。

ここで、緩衝材中の地下水流速 v は、緩衝材の透水係数のほかサイト条件（母岩の透水係数、動水勾配、EDZ の条件など）に依存する。従来の検討例では、サイト条件を仮定した上で地下水流速を算出し、ペクレ数が 0.1 より小さくなるよう緩衝材の密度が設定されている。ただし、その地下水流速の設定方法については、必ずしも明確に定義されていなかった。

なお、緩衝材の代表長さ L は、国内外の検討事例[9]を参考に緩衝材の厚さを採用する。

b 緩衝材中の地下水流速

緩衝材中の地下水流速は、動水勾配の向きや緩衝材中の透水係数の分布によって 3 次元的に分布すると考えられる。そのような緩衝材中の地下水流速に対して、上述のペクレ数の算出にあたって適用する流速 v の設定方法として、大きく 2 つの考え方がある。

- ・安全側に最大流速 V_{\max} をとる方法
- ・平均的な流速 V_{av} を用いる方法

以下では、まず緩衝材中の透水係数分布は一様であると仮定し、動水勾配は人工バリアの横断面方向（軸直角方向断面、図 6.1.2-1 参照）の成分を対象に考える。軸直角方向成分を対象とする理由は以下による。

- ・処分孔縦置き式の場合、再冠水後の地下深部の大局的な動水勾配は、軸方向（鉛直方向）成分よりも軸直角方向（水平）成分のほうが卓越すると想定されること
- ・横置き式では、処分坑道の向きは動水勾配に直行する方向に配置するのが基本とされていること

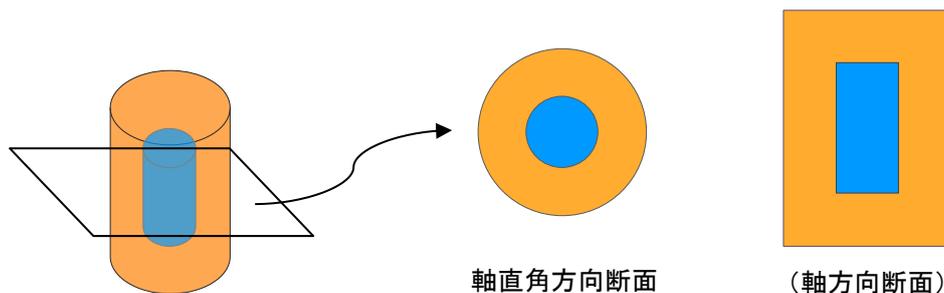


図 6.1.2-1 緩衝材の断面のイメージ

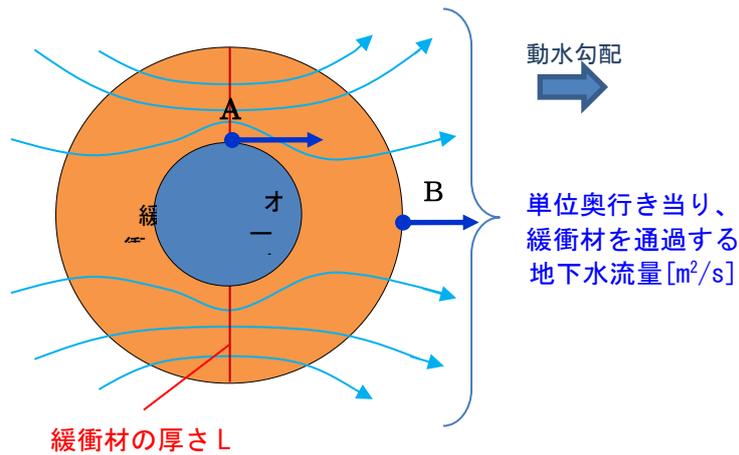


図 6.1.2-2 緩衝材の軸直角方向を通過する地下水流れのイメージ

本検討では同心円状に区分的に均質な水理場を考え、2次元定常理論解を適用して考える。緩衝材の外側境界面($r = r_2$ の円弧, 片側半円分)を通過する流量 Q [$\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$]は以下のように表現できる。

$$Q = -2k \left(Ar_2 - \frac{B}{r_2} \right)$$

ここで、 k は緩衝材の透水係数 [m/s]、係数 A [-] 及び B [m^2] は、領域間での水頭の連続性と水収支を境界条件として解くことによって決定される定数である。なお、このとき A 点の流速 v_A [m/s] および B 点の流速 v_B [m/s] は、オーバーパックの半径を r_1 、緩衝材の半径を r_2 として、それぞれ以下で与えられる。

$$v_A = -k \left(A + \frac{B}{r_1^2} \right)$$

$$v_B = -k \left(A - \frac{B}{r_2^2} \right)$$

■最大流速

オーバーパックの透水係数が緩衝材のそれより小さいとすれば、緩衝材における最大流速の発生位置は、図 6.1.2-2 に示す A 点となる。すなわち、

$$V_{\max} = -k \left(A + \frac{B}{r_1^2} \right)$$

■平均流速

平均流速 V_{av} は、「緩衝材を通過する地下水流量」をどの長さで割るかによって複数のパターンが考えられる。以下に3通りの案を示す。

<平均流速その1>

緩衝材の外側を通過する流量 Q を、その周長（図 6.1.2-3 の青線）で除した値：

$$V_{ave1} = \frac{Q}{\pi r_2} = \frac{Q}{\pi(r_1 + L)}$$

ここに、 r_1 ：オーバーパットの半径、 r_2 ：緩衝材の半径、 L ：緩衝材の厚さ

なお、この平均流速は、原環センターの安全評価解析[10]で採用されている。この事例にみられるように、既往検討の安全評価では緩衝材中の地下水流速として平均流速が採用されていると考えられる。

<平均流速その2>

緩衝材の外側を通過する流量 Q を、その直径（図 6.1.2-3 の緑線）で除した値：

$$V_{ave2} = \frac{Q}{2r_2} = \frac{Q}{2(r_1 + L)}$$

なお、この平均流速は、図 6.1.2-2 の B 点における流速に常に一致する。

<平均流速その3>

緩衝材の中央断面を通過する流量を、緩衝材厚さの2倍（表 6.1.2-2 の赤線）で除した値

$$V_{ave3} = \frac{Q}{2L}$$

なお、この平均流速は、ガラス固化体を通過する地下水流量を無視すれば、実質的に下図の赤線部分を通過する地下水流速の平均値になる。

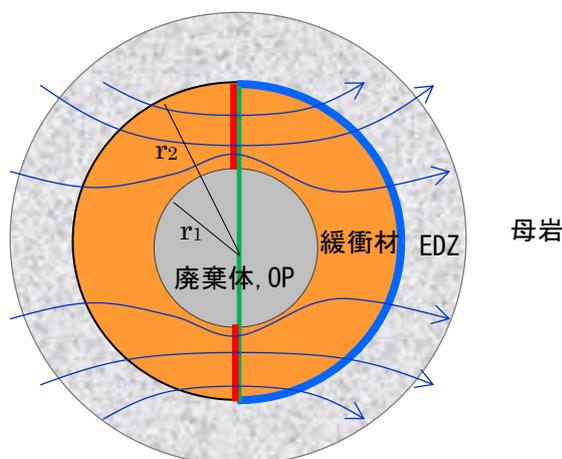


図 6.1.2-3 緩衝材中の平均地下水流速を説明するための概念図

上記の $V_{av1} \sim V_{av3}$ の定量的な関係は以下の通り、 $V_{av1} < V_{av2} < V_{av3}$ となる。

$$\begin{aligned} V_{av1} &< \frac{\pi}{2} V_{av1} \\ &= V_{av2} \\ &< \left(1 + \frac{r_1}{L}\right) V_{av2} = V_{av3} \end{aligned}$$

核種移行経路としての緩衝材が全体として拡散場になるかどうかに着目する場合、ペクレ数の算定において代表長さを「緩衝材の厚さ」としていることにも対応し、地下水流速は緩衝材の全体スケールとして平均的な値を設定すれば良いと考えられる。

そこで、ペクレ数の算定において適用する地下水流速は平均流速とし、上記の3通りのうち最も大きい V_{ave3} （平均流速その3）を採用する。

上記の平均流速を用いたペクレ数の算定例を図 6.1.2-4 に示す。ここでは、緩衝材の透水係数として 1E-8 m/s、1E-9 m/s、1E-10 m/s の3ケースを考え、その他の条件は以下の通りとした。すなわち、母岩の透水係数は HLW 第2次とりまとめ[11]レファレンスケース相当とし、EDZの幅と透水係数も HLW 第2次とりまとめの設定に準じた。また、実効拡散係数は、HLW 第2次とりまとめの設定値を安全側に切り下げた値とした。また、参考まで、母岩の透水係数と動水勾配を変更した場合のペクレ数の変化を付録資料に示す。

- ・ 動水勾配：0.05
- ・ 母岩の透水係数：2E-10 m/s
- ・ EDZの幅：0.5 m
- ・ EDZの透水係数：2E-9 m/s（母岩の10倍）
- ・ 実効拡散係数：1E-10 m²/s

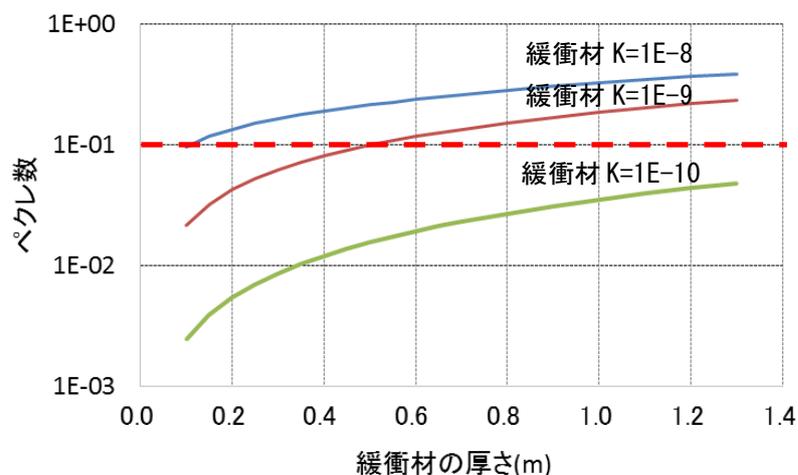


図 6.1.2-4 緩衝材の厚さに対応するペクレ数の試算結果

図 6.1.2-4 より、上記の試算条件のもとでは、緩衝材の厚さが薄い場合を除いて、その透水係数が $1E-8m/s$ および $1E-9m/s$ ではペクレ数が 0.1 を上回るが、透水係数が $1E-10m/s$ より小さければ緩衝材の厚さに関わらずペクレ数が 0.1 を下回ることがわかる。そこで、ここでは緩衝材の透水係数を $1E-10m/s$ 以下にすることを考える。

JAEA 緩衝材 DB のクニゲル V1 の透水係数のデータと、これに対して Kozeny-Carman 則[15] でフィッティングしたものを図 6.1.2-5 に示す。人工海水の場合、図より透水係数を $1E-10m/s$ にするためには有効粘土密度を $1.0Mg/m^3$ 以上にする必要のあることがわかる。

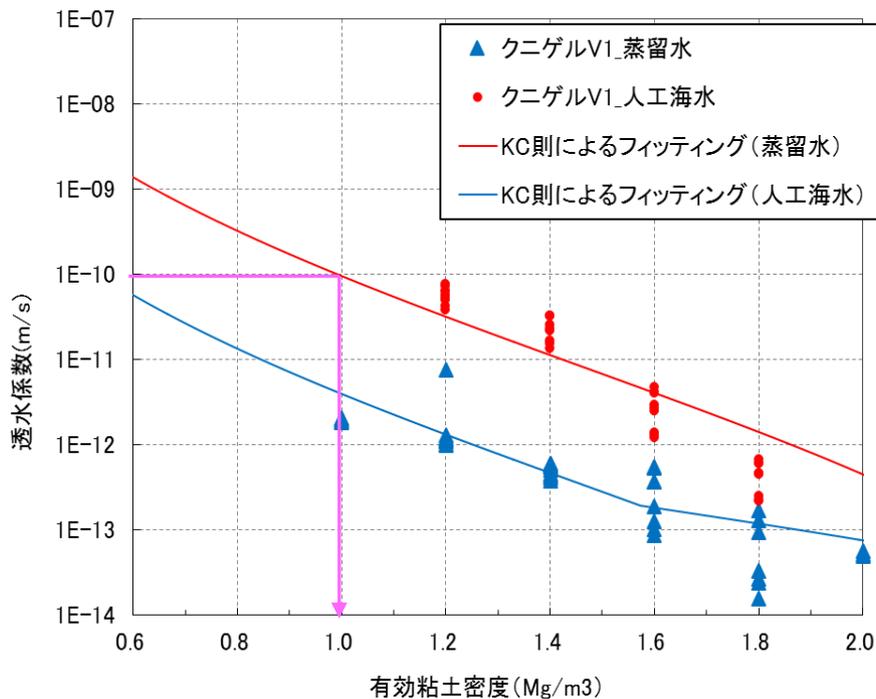


図 6.1.2-5 有効粘土密度と透水係数の関係 (クニゲル V1、人工海水)

c 施工時の隙間の影響

前述した通り、施工時の隙間によって、膨潤後の緩衝材に密度差の生じることが懸念される。この残留密度差は、緩衝材中の透水係数が不均質に分布する可能性を意味し、これが地下水流速に有意な影響を及ぼす可能性が懸念される。

そこで、施工時の隙間を仮定して膨潤後の緩衝材中の密度を試算し、緩衝材中の地下水流速分布への影響について検討した。

(a) 緩衝材中の密度分布の検討

施工時の隙間により、膨潤後の緩衝材には密度分布が生じることが懸念される。この密度分布について、以下に試算する。

検討ケースを表 6.1.2-3 に示す。ここでは、緩衝材の厚さは 700mm で外側に 40mm の隙間の存在を仮定し (図 6.1.2-6)、材料はケイ砂 30%混合、乾燥密度 $\rho_d = 1.6Mg/m^3$ の仕様を想定した。

なお、ケイ砂の土粒子密度は $\rho_s=2.64\text{Mg/m}^3$ を仮定した。

表 6.1.2-3 隙間を考慮した膨潤後の密度分布に関する検討ケース

case	隙間の充填に寄与する緩衝材の領域	備考
1	全体が均質に膨潤して隙間を充填	(膨潤後の密度は一様との従来の考え方)
2	約半分の領域が膨潤して隙間を充填	40%膨潤ベントナイトの圧密試験結果 [12]を適用して設定
3	2cm 程度の領域が膨潤して隙間を充填	330% "

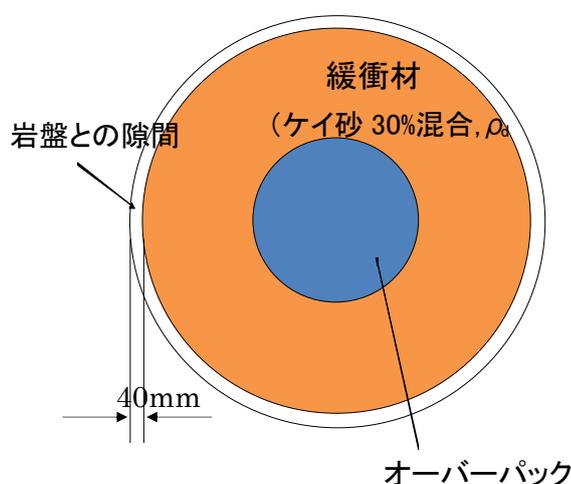


図 6.1.2-6 検討において想定した仕様（施工時）

case1 は、従来の考え方と同様、膨潤後は緩衝材全体が均質一様になると仮定したものである。case2 および case3 では、便宜的に図 6.1.2-7 に示すステップ 1 およびステップ 2 の流れで膨潤後の平衡状態に至ることを仮定した。

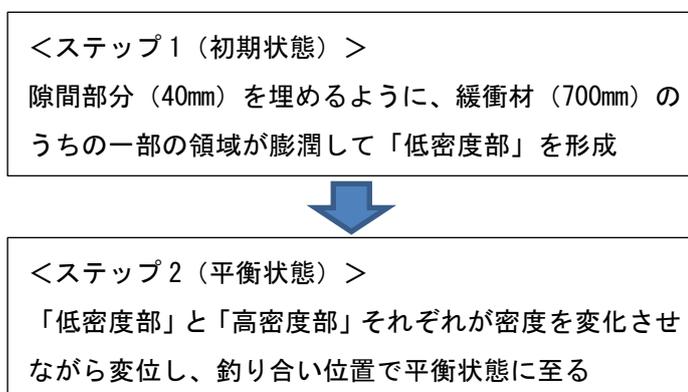


図 6.1.2-7 密度分布に関する検討の流れ

ステップ1においては、低密度部の密度は均質であると仮定する（この意味では、Case1も同様の考え方で「緩衝材の全領域が隙間の充填に寄与した」とできる）。また、隙間の充填に寄与しない領域（「高密度部」）の密度は施工時と変わらないとする。低密度部の形成に関して、Case2では、緩衝材厚さ70cmのうちおよそ半分の領域が隙間の充填に寄与し、Case3では、70cmのうちの約2cmが隙間の充填に寄与すると仮定した。ステップ2においては、前述の小林ほか（2010）の知見を活用し、既往の圧密試験結果（笹倉ほか、2002[12]）を利用して、1次元の間隙比-応力関係（ $e-\log p$ ）より換算した有効ベントナイト密度-応力関係に基づいて釣合い位置を試算した。なお、ステップ2においても、高密度部および低密度部はそれぞれで均質であると仮定する。

以上に述べた検討の流れを図6.1.2-8に模式的に示す。

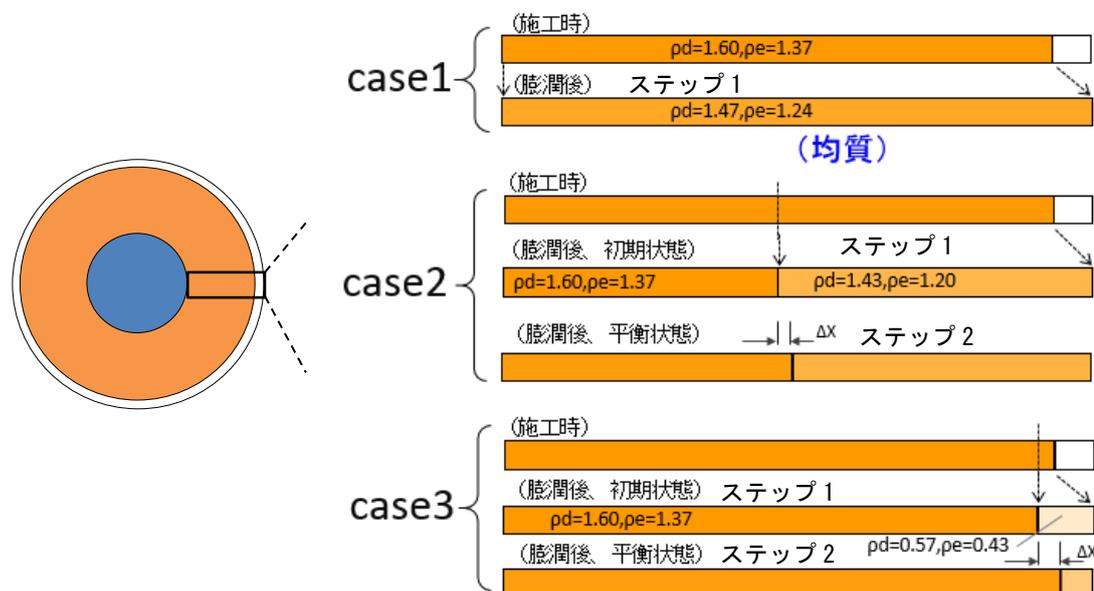


図 6.1.2-8 各ケースの検討イメージ

case2 および case3 は、それぞれ笹倉ほか（2002）[12]に記載される高圧圧密試験のうち、供試体の膨潤率が40%および330%の試験データ（ $e-\log p'$ 曲線）を利用したものである。本試験は、供試体を乾燥密度 1.6Mg/m^3 の状態からある膨潤率まで膨潤させた後に圧密を実施したものであり、その膨潤率として20%、40%、330%（最大膨潤率）の試験データが報告書に記載されている。本検討では、低密度部の挙動（隙間を埋めるためにある膨潤率まで一旦膨潤し、続いて高密度部から圧密される）を試算的に評価するため、case2、case3の低密度部の膨潤時の膨潤率に相当する20%（case2）及び330%（case3）の試験結果を利用した。

それぞれのケースにおける膨潤後の初期状態（上記ステップ1）は、上記試験データの $e-\log p'$ 曲線上で過圧密領域から正規圧密領域に変わる点として設定した。平衡状態（上記ステップ2）は、図6.1.2-9および図6.1.2-10に示すように、小林ほか（2010）[4]の知見に則って応力の釣合う位置を試算した。なお、図中の青線は笹倉ほか（2002）[12]の試験結果（ $e-\log p'$ 曲線）を用い、間隙率 e から密度を換算して作成したものである。

各ケースにおける初期状態と平衡状態における高密度部・低密度部の厚さと密度を表 6.1.2-4 および表 6.1.2-5 に示す。また、これらの関係を case1 も含めて図 6.1.2-11 に図示する。case2、case3 とともにステップ 1 の状態に対し、高密度部が低密度部を圧縮するためステップ 2（平衡状態）ではその境界が低密度側に移動するとともに、高密度部の密度は低下し低密度部の密度は増加している。case3 では初期状態における高密度部と低密度部の密度の差が非常に大きいため、平衡状態でもその密度差が大きい。

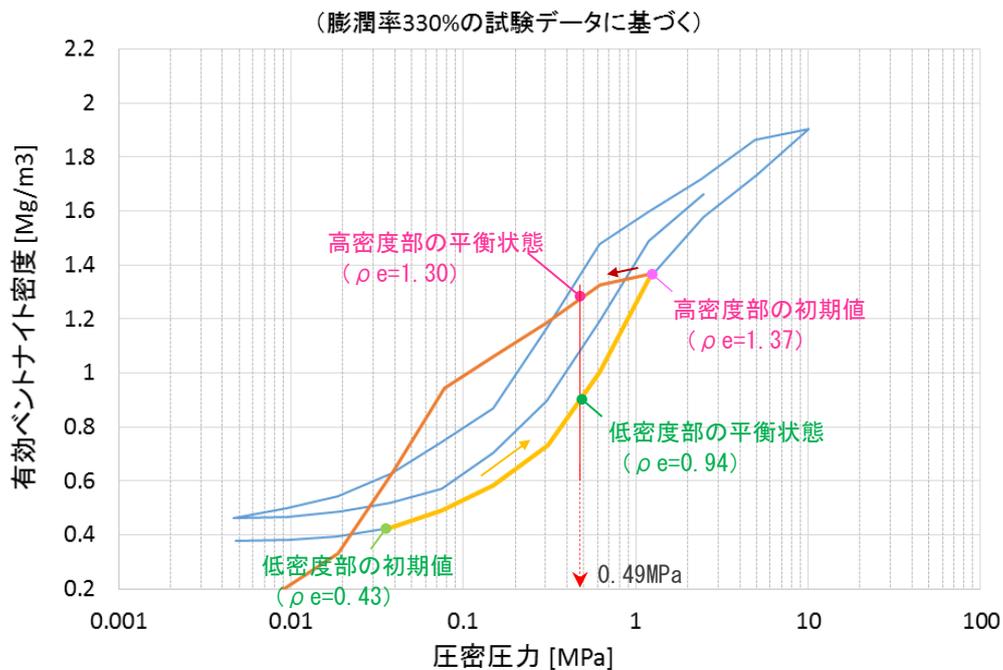
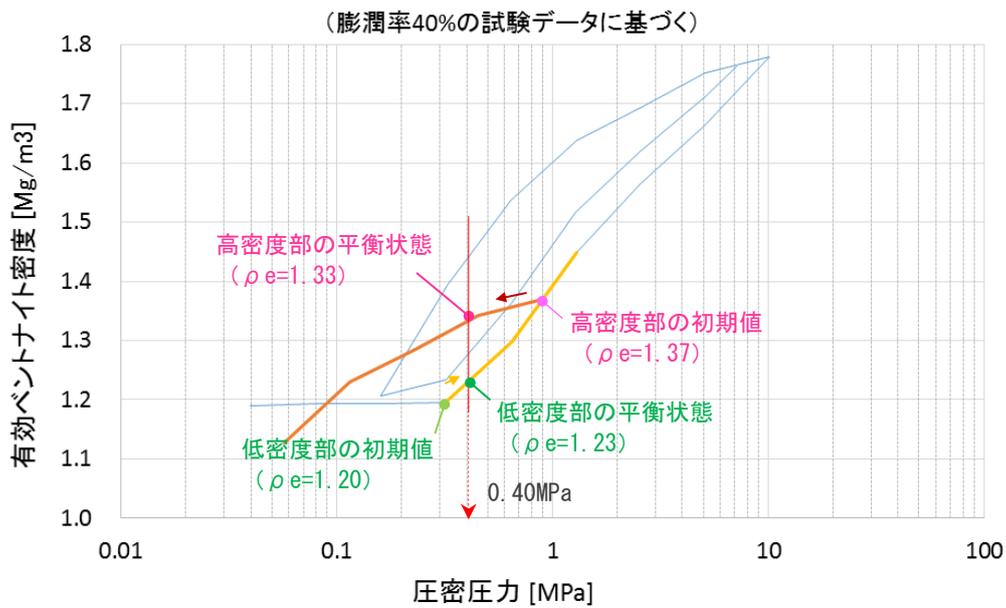


表 6.1.2-4 高密度部と低密度部の厚さおよび密度 (case2)

	高密度部			低密度部		
	厚さ [mm]	乾燥密度 [Mg/m ³]	有効粘土密度 [Mg/m ³]	厚さ [mm]	乾燥密度 [Mg/m ³]	有効粘土密度 [Mg/m ³]
施工時	700	1.60	1.37	40 (隙 間)	—	—
初期状態	364	1.60	1.37	376	1.43	1.20
平衡状態	372	1.56	1.33	368	1.46	1.23

表 6.1.2-5 高密度部と低密度部の厚さおよび密度 (case3)

	高密度部			低密度部		
	厚さ [mm]	乾燥密度 [Mg/m ³]	有効粘土密度 [Mg/m ³]	厚さ [mm]	乾燥密度 [Mg/m ³]	有効粘土密度 [Mg/m ³]
施工時	700	1.60	1.37	40 (隙 間)	—	—
初期状態	678	1.60	1.37	62	0.57	0.43
平衡状態	710	1.53	1.30	30	1.17	0.94

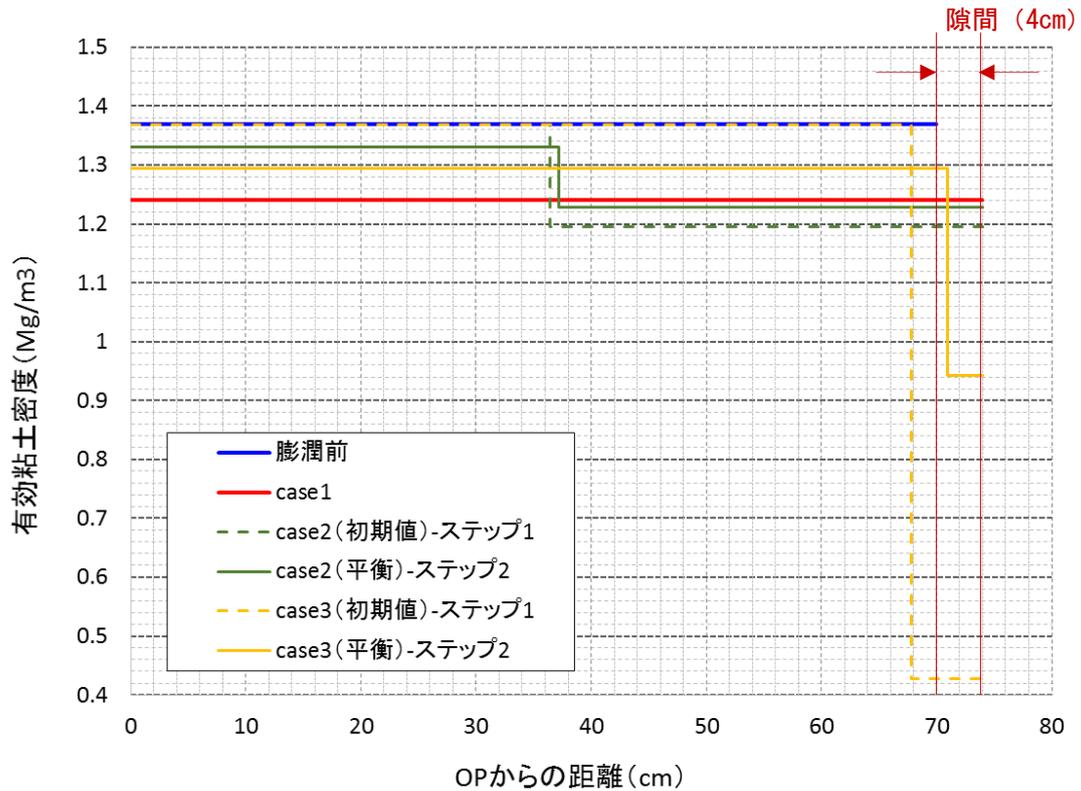


図 6.1.2-11 各ケースの膨潤後の密度分布の試算結果

(b) 緩衝材中の流速分布の検討

上記で得られた密度分布に基づき、緩衝材中の地下水流速分布について検討する。

上記の各ケースの密度から、後述する Kozeny-Carman 則により透水係数を設定した結果を図 6.1.2-12 に示す。この透水係数分布を用いて 2 次元定常理論解により地下水流速分布を算定し、流速の最大値をプロットした結果を図 6.1.2-13 に示す。

なお、ここでは地下水流速の算定にあたって以下の条件を仮定した。

- ・母岩透水係数： $2E-10$ m/s
- ・巨視的動水勾配：0.01
- ・EDZ の厚さ：0.5m
- ・EDZ の透水係数： $2E-9$ m/s (母岩の 10 倍)

図 6.1.2-13 に示す通り、緩衝材中の地下水流速の最大値は $1E-6$ m/y 程度である。なお、今年度別途実施されている亀裂を有する岩盤での処分孔を模擬した緩衝材流出試験からは、亀裂内の流速が $4\text{cm}/\text{min}$ (約 $2E+4$ m/y) を少し上回る程度であれば膨潤により亀裂内にベントナイトが浸入でき、 $4\text{cm}/\text{min}$ 以下であれば、ベントナイトが流出しても沈殿が発生する見通しが得られている。これは限られた試験条件に基づく結果であるため参考事例に過ぎないが、流速のオーダーの違いを考慮すれば、隙間に起因した密度差によってエロージョンの発生する可能性は小さいと想定される。

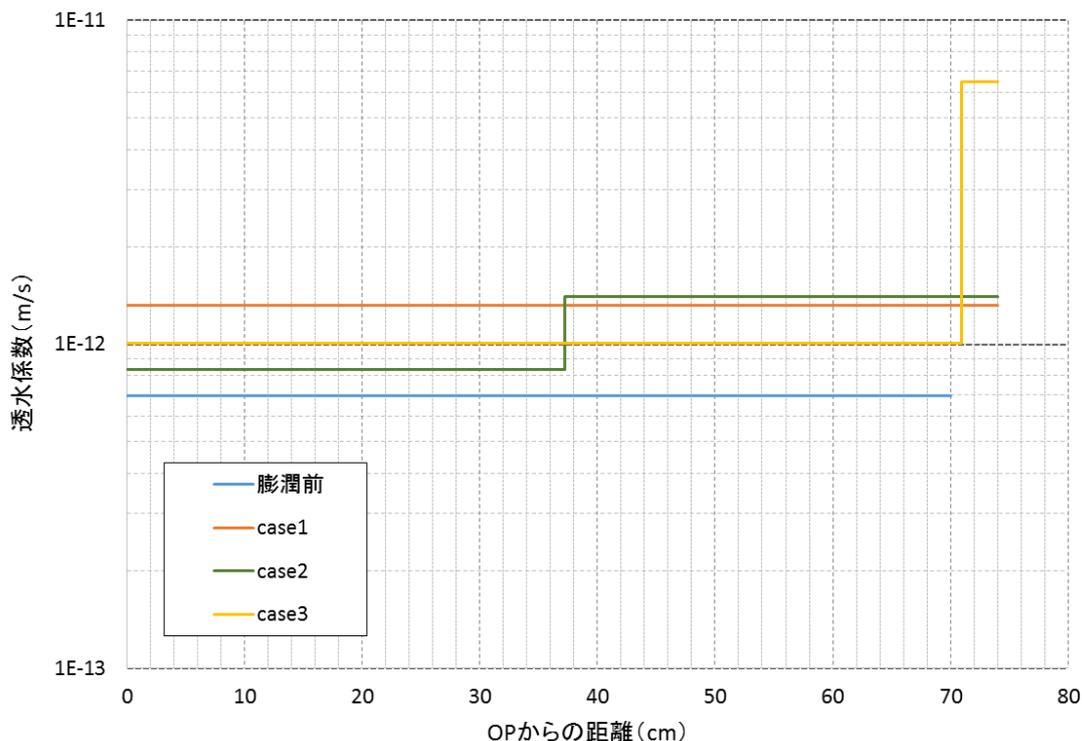


図 6.1.2-12 各ケースの膨潤後、平衡状態における透水係数

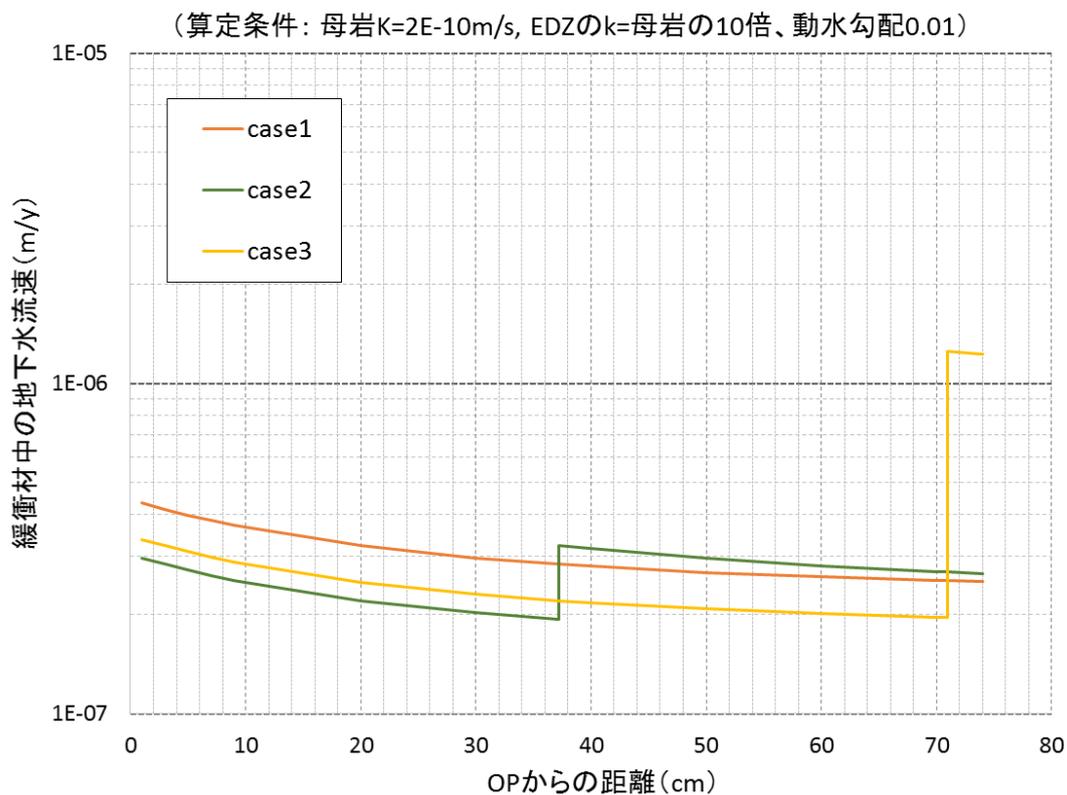


図 6.1.2-13 緩衝材中の地下水流速（最大値）の分布

今回、施工時の隙間を 40mm と仮定して試算した上記の結果から、case3 では局所的に地下水流速が大きくなる傾向が示された。このことから、緩衝材の地下水流速の許容値（現時点では未設定）に対し、隙間の大きさによっては、図 6.1.2-14 のイメージに示す通り、膨潤後の地下水流速が局所的には許容値を満足しなくなる可能性がある。

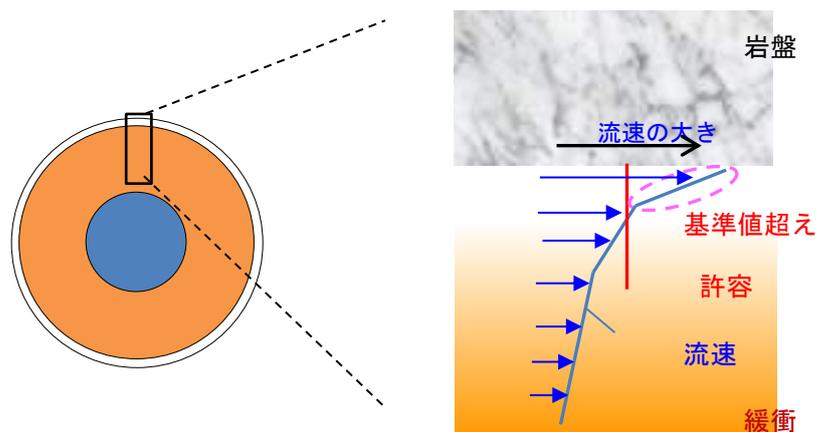


図 6.1.2-14 想定し得る緩衝材中の地下水流速分布のイメージ

設計の一つの方法としては、このような領域が発生しないように、緩衝材の密度を上げて緩衝

材の全ての領域で地下水流速が基準値以下となるようにすることが考えられる。

この点について、以下に検討を加える。

検討ケースとしては、前述の case1 に対応した緩衝材が均質な場合（ケース a）、前述の case3 に対応して施工時に 40mm の隙間が緩衝材の外側に存在する場合（ケース b）、およびケース b とは逆に 40mm の隙間が緩衝材の内側に存在する場合（ケース c）の 3 ケースを設定した。設定したケースのイメージを図 6.1.2-15 に示す。

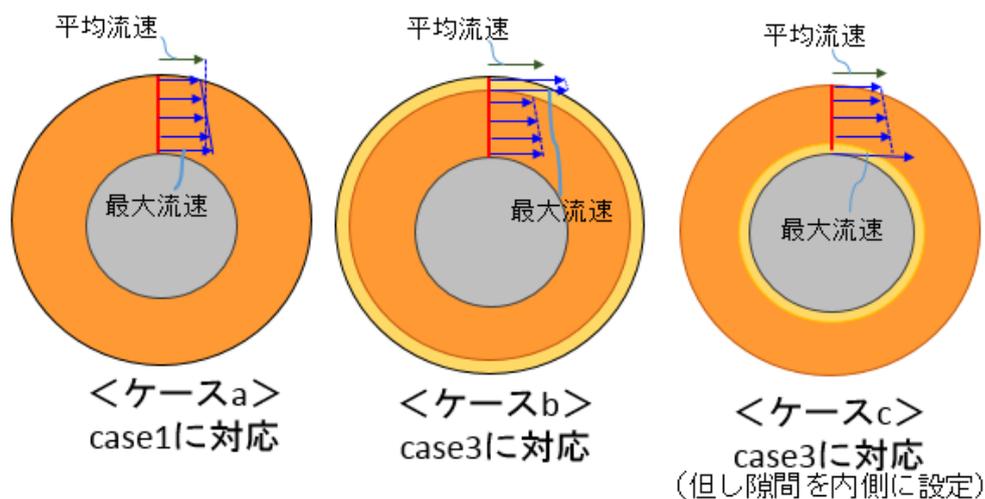


図 6.1.2-15 検討ケースおよび各ケースの流速分布イメージ

検討条件は、前述の通り、母岩透水係数を $2E-10$ m/s、巨視的動水勾配を 0.01-、EDZ の厚さを 0.5m、EDZ の透水係数を $2E-9$ m/s（母岩の 10 倍）とした。

二次元定常理論解により求めた各ケースの流速分布の例を図 6.1.2-16 および図 6.1.2-17 に示す。図 6.1.2-16 の横軸は、動水勾配に直交する方向での OP からの距離であり、図は廃棄体中心からの距離が等しい位置における緩衝材中地下水流速の最大値を示すものとなる。一方、図 6.1.2-17 の横軸は動水勾配と平行な方向における OP からの距離をとったものである。なお、各図には各ケースの平均流速（前述の「平均流速その 3」に対応）を破線で示した。また、既往検討の安全評価における設定の考え方にそった緩衝材中の地下水流速（ケース a に対する前述の「平均流速その 1」に相当、図 6.1.2-18 の青線で示す緩衝材の外周面を通過する平均流速）も追記した。

両図より地下水流速は 2 次元的に分布していることがわかり、ケース b およびケース c では動水勾配の直交軸上での流速が低密度部で局所的に大きくなっているが（図 6.1.2-16）、動水勾配の平行軸上では平均流速を下回る（図 6.1.2-17）。既往の安全評価においては、このような緩衝材中の流速分布を考慮した核種移行評価は実施されておらず、評価においては平均的な地下水流速が用いられている。すなわち、必ずしも緩衝材中の局所的な最大流速を考慮した評価がなされているわけではない。ここで、各ケースの緩衝材中の地下水流速の最大値および平均値を表 6.1.2-6 にまとめる。

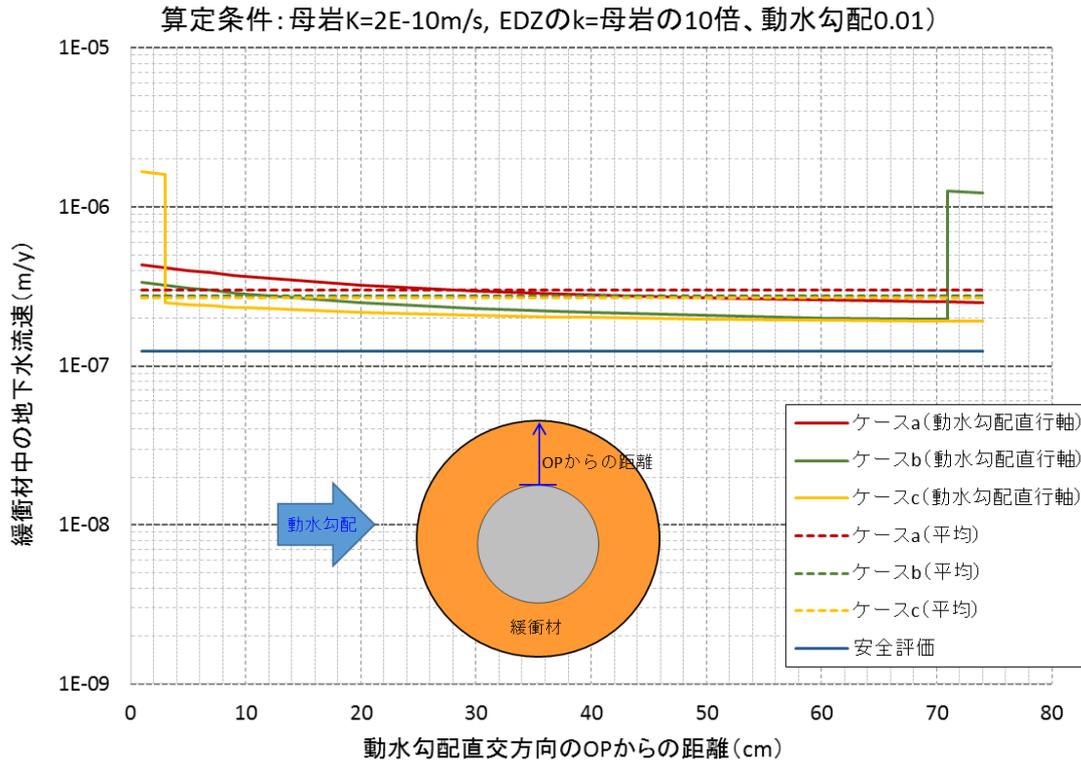


図 6.1.2-16 緩衝材中の地下水流速分布の試算結果 (動水勾配直交方向)

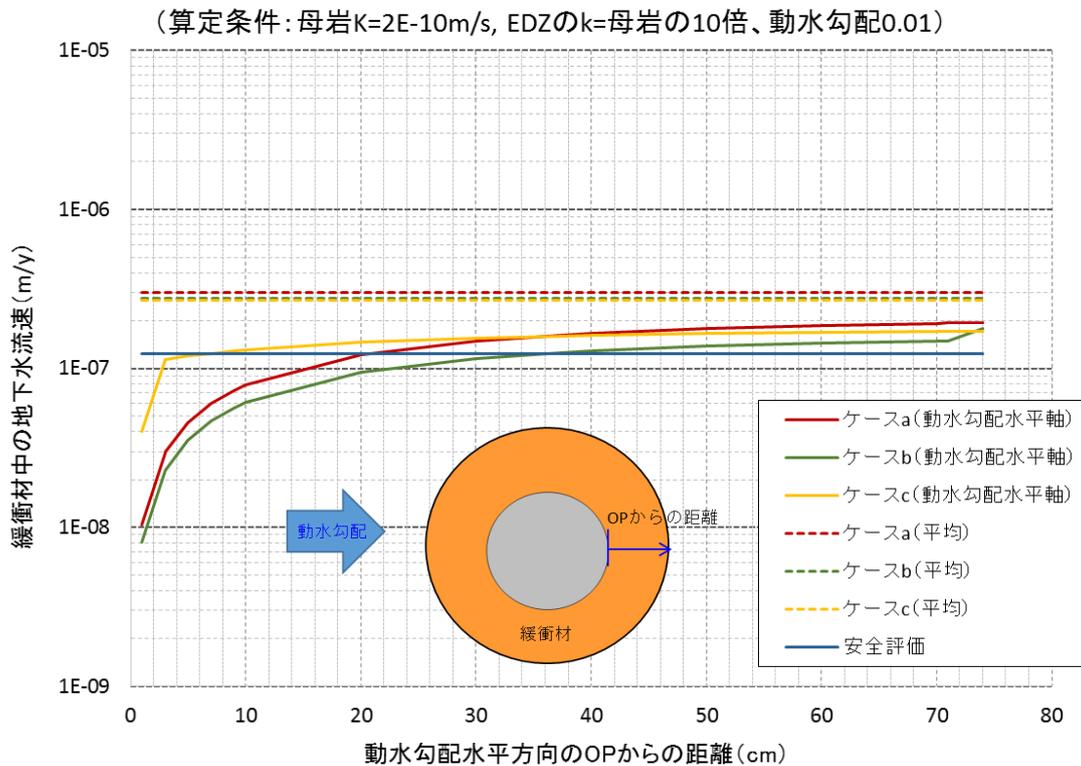


図 6.1.2-17 緩衝材中の地下水流速分布の試算結果 (動水勾配平行方向)

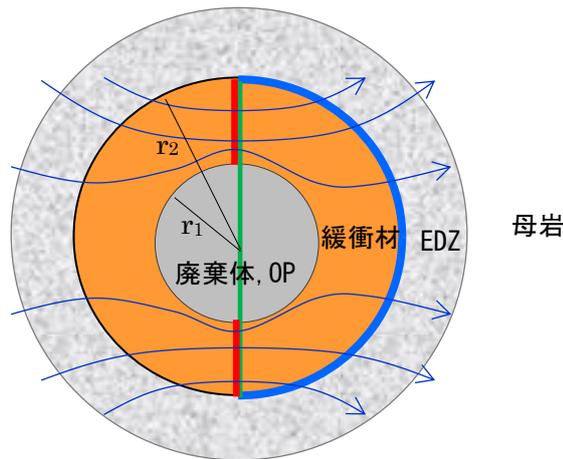


図 6.1.2-18 緩衝材中の平均地下水流速を説明するための概念図（再掲）

表 6.1.2-6 各ケースの緩衝材中の地下水流速の最大値および平均値

	最大流速[m/s]	平均流速[m/s]
ケース a	4.3E-7	3.0E-7
ケース b	1.3E-6	2.8E-7
ケース c	1.6E-6	2.7E-7

上記試算結果より、ケース b、c においては最大流速が局所的に大きくなるものの、これらのケースの平均流速は、均質な膨潤を仮定したケース a の平均流速とほぼ同じであるといつてよい。また、ケース b、c の設定では、4cm の隙間をおよそ 2cm の緩衝材が膨潤して埋めると仮定したものであり、比較的膨潤後の密度が小さく透水係数は大きい設定になっていると考えられる。これらのことから、施工時の隙間による残留密度差によって高透水部が生じたとしても平均流速としては有意な影響は受けず、その値は均質一様膨潤を仮定した場合とほぼ同様になる見通しが得られた。

よって、この算出例においてはペクレ数の算定に際して適用する緩衝材中の地下水流速は、平均流速として問題ないことが確認できた。またその平均流速を算定するにあたり、施工時の隙間がある場合には、緩衝材が膨潤により隙間部分を充填して密度が均質になるものと仮定することで良いと考えられる。

一方、最大流速に着目するとした場合、上表の結果では、平均流速よりもおよそ 5 倍程度大きくなっている。

ここで、仮に「平均流速ではペクレ数の基準を満足するが、最大流速を用いるとペクレ数が基準値の 5 倍になる」との状況を想定し、上記ケース b の最大流速を 1/5 倍（平均流速と同等の流速、約 3.0E-7 m/s）に低減するために必要となる初期乾燥密度について検討する。

上記の流速は初期乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{ Mg/m}^3$ に対する値であったが、ここでは $\rho_d = 1.7 \text{ Mg/m}^3$ お

よび $\rho_d = 1.8 \text{ Mg/m}^3$ に対して前述と同様の手法により最大流速を試算した。(表 6.1.2-7)。試算結果から、この場合、初期乾燥密度を約 1.8 Mg/m^3 にする必要があると考えられる。すなわち、最大流速を用いて算出されるペクレ数が平均流速を用いた場合のペクレ数と同程度になるためには、初期乾燥密度を大幅に上乘せする必要(上記例では $1.6 \rightarrow 1.8$)が生じる可能性があるといえる。

表 6.1.2-7 緩衝材の初期乾燥密度と最大流速 (ケース b 相当)

最大流速の 目標値 (m/s)	初期乾燥密度 (Mg/m ³)	最大流速 (m/s)	参考—平均流速 (m/s)
3.0E-7	1.6	1.3E-6	2.8E-7
	1.7	6.3E-7	1.6E-7
	1.8	2.9E-7	9.7E-8

2) コロイドろ過性

コロイドろ過性については、コロイドが緩衝材中を透過しないように(コロイド透過率=0)、緩衝材の密度を設定する。

表 6.1.2-8 コロイドろ過性に対する指標および基準 (案)

設計要件	指標	基準
コロイドろ過性	コロイド透過率	0

降水系地下水条件に対し、黒澤ほか(2003) [13]、Kurosawa et al. (2006) [16]では、ベントナイトとケイ砂混合土の金コロイド(15nm)に対するそれまでの試験結果を再整理し、有効粘土密度が 0.8 Mg/m^3 以上であればコロイドろ過能が期待できると報告されている(図 6.1.2-19)。

海水系地下水条件や Ca 型化に対しては、黒澤ほか(2003) が、乾燥密度 1.6 Mg/m^3 のベントナイトとケイ砂混合土(ケイ砂混合率 30%) のコロイド透過試験を行ってコロイドが透過しないことを確認しているが、下限値を設定するだけの十分なデータが蓄積されていない。しかし、塩水やセメントから溶出されるアルカリ性成分などのイオン強度の増加により、コロイド粒子は凝集してより大きな粒子になることから、降水系地下水条件の場合よりも透過し難くなると考えられるため、コロイドろ過能については、地下水条件や Ca 型化に関わらず、有効粘土密度の下限を 0.8 Mg/m^3 と設定することは妥当と考えられる。

以上より、本検討では既往の知見に基づき、コロイドろ過性を満足する緩衝材の有効粘土密度の下限値を 0.8 Mg/m^3 と設定する。

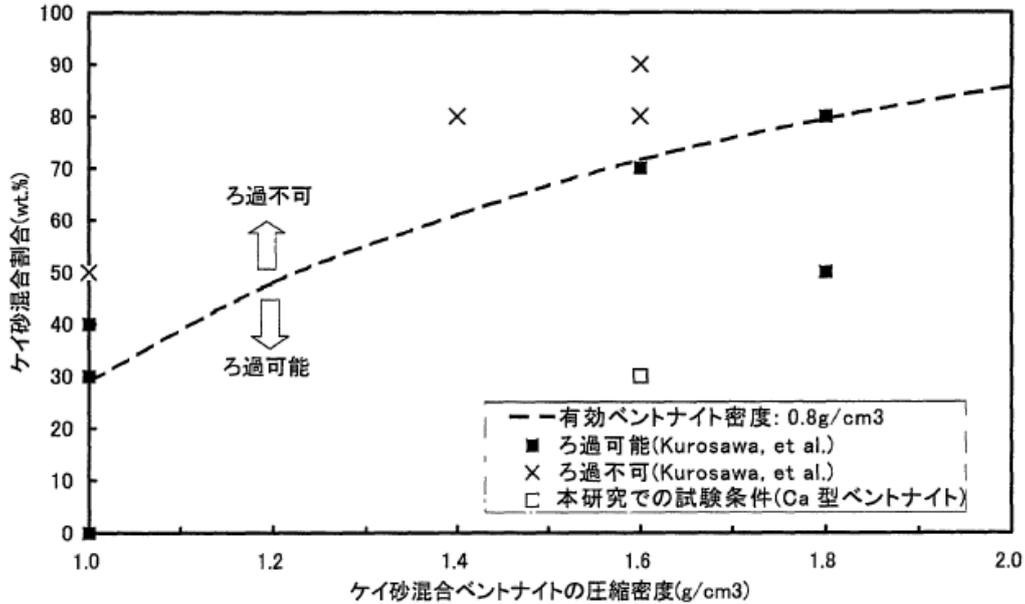


図 6.1.2-19 コロイドろ過効果を発揮する緩衝材密度とケイ砂混合率の関係 (JNC、2003)

3) 自己シール性

自己シール性については、施工時に生じる隙間を緩衝材の膨潤により余裕をもって閉塞できるような仕様を設定する。具体的には、緩衝材に隙間体積を充填できるだけの膨潤性能に加えて「膨潤余裕代」(隙間充填後の体積に対してさらに膨潤可能な体積の割合)を見込んだ仕様を設定する。既往検討における設計の考え方は、緩衝材に隙間の体積の2倍 (HLW 第2次とりまとめ) の膨潤性能をもたせるものであった。この考え方による設計では、隙間充填後 (自己シール後) の膨潤余裕代は隙間の量に依存するため、施工時の隙間が小さい場合には膨潤余裕代が小さくなってしまいう課題がある (図 6.1.2-20)。そこで、緩衝材体積に対する施工時の隙間体積の割合として最大 1/10 までの範囲を考え (おおよそ緩衝材厚さ 700mm に対する隙間 60mm (緩衝材～岩盤の隙間 40mm とオーバーバック～緩衝材の隙間 20mm の和) の割合に相当)、常に従来の設計方法より膨潤余裕代が大きくなるよう、膨潤余裕代は体積比として 0.1 以上を設定する。図 2.4 21 に示す通り、この指標を採用すれば隙間量が小さい場合においても一定の膨潤余裕代が確保できることとなる。

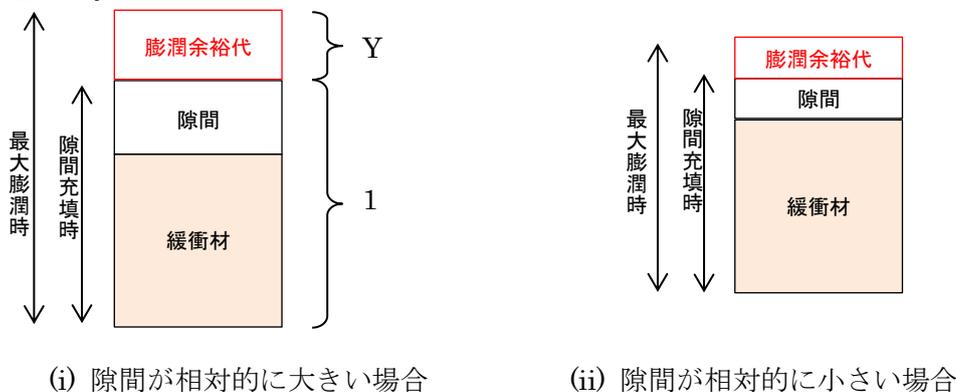


図 6.1.2-20 膨潤余裕代の概念と従来手法の課題

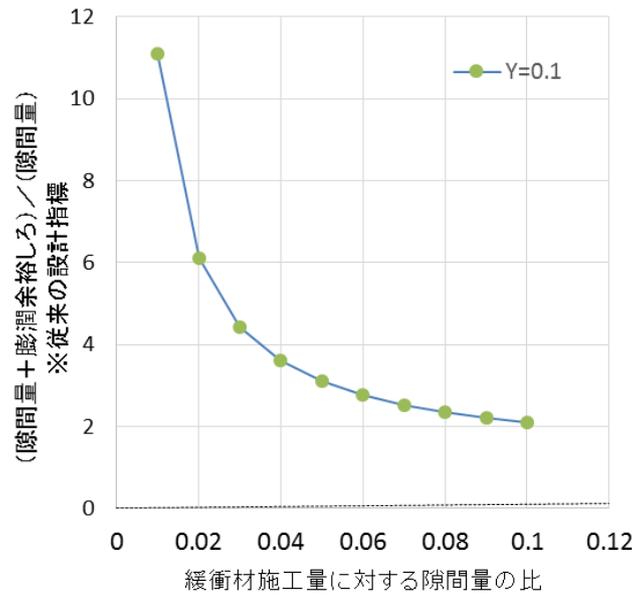


図 6.1.2-21 隙間量と従来の設計指標との対応

表 6.1.2-9 自己シール性に対する指標および基準 (案)

設計要件	指標	基準
自己シール性	膨潤余裕代 (隙間充填後体積に対してさらに膨潤可能な体積の割合)	0.1 以上

田中ほか (2005) [14]は、表 6.1.2-10 に示した 4 種類のベントナイトに対して海水濃度が膨潤特性に及ぼす影響を評価するために実験的検討を実施している。人工海水の濃度をパラメータとして実施した膨潤変形試験結果のうち、最大膨潤率と初期乾燥密度の関係を図 6.1.2-22 に示す。Na 型ベントナイトであるベントナイト A、B、D は、概ね人工海水濃度の増加に伴い最大膨潤率が低下するのに対して、Ca 型ベントナイトであるベントナイト C の最大膨潤率は、人工海水濃度の影響をほとんど受けていない。

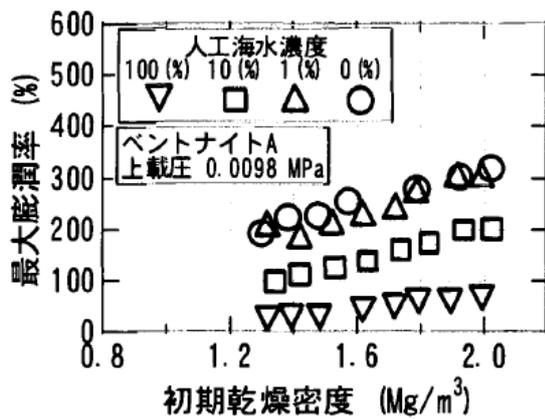
表 6.1.2-10 田中ほか (2005) [14]の膨潤変形試験に供したベントナイトの基本的性質

ベントナイト	A	B	C	D
タイプ	Na 型	Na 型	Ca 型	Na 交換型
土粒子の密度 (Mg/m ³)	2.79	2.84	2.71	2.68
液性限界 (%)	473.9	628.2	144.5	607.5
塑性限界 (%)	26.61	44.8	63.87	50.69
塑性指数	447.3	583.4	80.6	556.8
活性度	6.93	6.35	4.36	7.79
塑性比	16.81	13.02	1.26	10.98
粘土分 (<2 μ m) 含有率 (%)	64.5	91.9	18.5	71.5
モンモリロナイト含有率 ^{注1)} (%)	48	69	80	76
陽イオン交換容量 ^{注2)} (meq/g)	0.732	1.007	0.796	1.035
交換性 Na イオン量 ^{注3)} (meq/g)	0.405	0.566	0.119	0.62
交換性 Ca イオン量 ^{注3)} (meq/g)	0.287	0.293	0.585	0.333
交換性 K イオン量 ^{注3)} (meq/g)	0.009	0.016	0.019	0.019
交換性 Mg イオン量 ^{注3)} (meq/g)	0.03	0.132	0.072	0.063

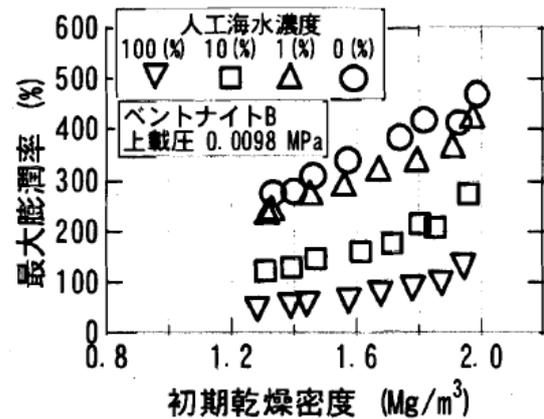
注1) メチレンブルー吸着量試験により測定

注2) 交換性 Na, Ca, K, Mg イオン量の総和

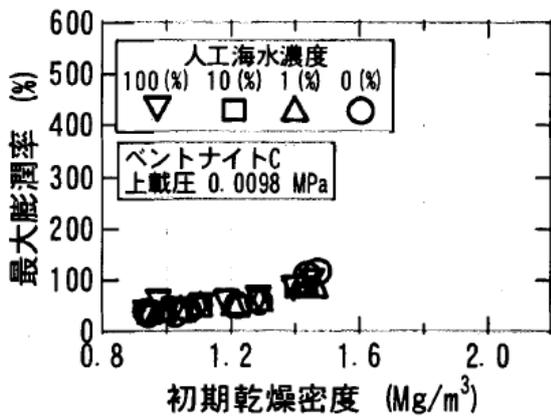
注3) IN 酢酸アンモニウム (CH₃COONH₄) 抽出法により測定



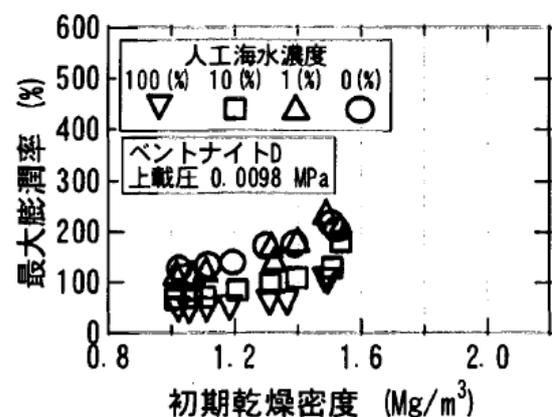
(a) ベントナイト A (上載圧 0.0098 MPa)



(b) ベントナイト B (上載圧 0.0098 MPa)



(c) ベントナイト C (上載圧 0.0098 MPa)



(d) ベントナイト D (上載圧 0.0098 MPa)

図 6.1.2-22 最大膨潤率と初期乾燥密度の関係 (田中ほか、2005)

田中ほか (2005) [14]の膨潤変形試験結果によると、

- ・ 人工海水濃度が高いほど最大膨潤率が小さい
- ・ 人工海水 100%で比較すると、ベントナイト A の最大膨潤率（図 6.1.2-22(a)の▽）が最小となる

ことがわかる。図 6.1.2-22(a)の▽で示されたデータは、(1.0,0.0)と(2.2,100)を通る直線で概ね近似可能であると考え、初期乾燥密度 ρ_e [Mg/m³]と最大膨潤率 ε_{vb} [%]の関係は次式で表わされる。

$$\varepsilon_{vb} = 83.3\rho_e - 83.8 \quad (\text{海水系地下水})$$

4) 自己修復性

オーバーパックの腐食等によって発生するガスが蓄積され、ガス圧が上昇すると緩衝材にガスの透気経路が形成される可能性がある。緩衝材にこのような亀裂が生じて閉塞できることを要件とする。参考となる既往検討事例を以下に示す。

穂刈ほか（1996）[17]では、ガス透過の影響を受けても遮水性が変化しないことを自己修復性と捉え、ガス破過前後のベントナイト混合土の透水性の変化を調べている。この試験結果を表 6.1.2-11 に示す。穂刈ほか（1996）では、この実験結果について『ガス破過後の透水試験においては、ガスの透過によって脱水・収縮していたゲルが水の供給によって再び膨潤し、最終的には、膨潤したゲルが再び気みちを閉塞し、初期状態のようにゲルが骨材間隙を満たす状態に戻るため、透水性能にも変化が生じない』と分析している（浸透率のガス破過前後の変化に及ぼす密度の影響には言及していない）。

田中ほか（2009）[18]によるガス破過前後の透水係数の試験結果を図 6.1.2-23 に示す。試験は $\rho_e=1.218\sim 1.585\text{Mg/m}^3$ の範囲で実施されており、いずれもガス破過後の透水係数はガス破過前の透水係数よりもやや小さくなる結果が得られている。その理由として、田中ほか

（2009）ではガス破過後の飽和度が 100%に回復せず不飽和になることで透水係数が低下した可能性が指摘されている。また、ガス破過による損傷によりベントナイトの透水係数が顕著に増大する可能性は低いと考察されている。

以上の知見をふまえて、本検討では、自己修復性は自己シール性に包含される（自己シール性の「膨潤余裕代」を満足することにより、自己修復に必要な膨潤性能は満足される）ものと考えられる。

表 6.1.2-11 一軸透水・透気試験結果 (穂刈ほか、1996)

試験条件				浸透率 (m ²)		
B/B+S (%)	細粒分含有率 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	事前透水	透気	事後透水
20	9	1.682	16.2	1.61E-18	2.01E-16	7.96E-19
	1	1.774	14.0	5.53E-19	8.27E-15	5.23E-19
17.5	9	1.714	14.1	1.14E-18	3.26E-15	9.03E-19
	1	1.734	14.1	1.11E-18	2.95E-15	9.92E-19
15	9 ¹⁾	1.626	17.9	2.60E-18	4.80E-17	2.90E-17
	9	1.667	15.8	1.57E-18	1.58E-15	1.96E-18
	9	1.675	15.8	1.50E-18	3.63E-16	1.61E-18
	1	1.780	12.6	4.60E-19	3.41E-15	7.17E-19
	1	1.806	14.6	4.92E-19	8.36E-15	1.64E-20
	1	1.817	14.6	8.49E-19	6.31E-16	7.68E-19
	1	1.812	14.6	7.07E-19	3.23E-17	6.65E-19

1) 再飽和・透水試験にケロシンを使用した供試体

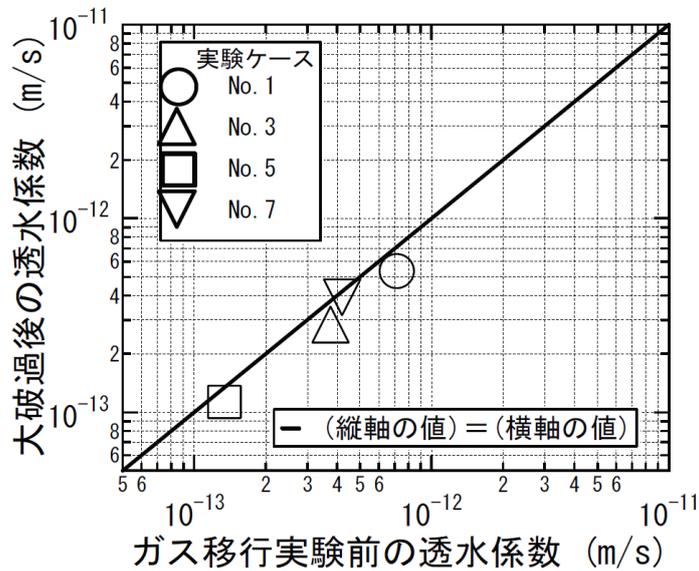


図 6.1.2-23 ガス破過前後の透水係数の比較 (田中ほか、2009)

5) 物理的緩衝性

オーバーパックの腐食膨張により、緩衝材は体積減少し圧密反力の増加をもたらすことになる。緩衝材の物理的緩衝性については、この反力（岩盤クリープ応力が作用する場合はこれも含む）と地下水静水圧とを足し合わせた応力が、オーバーパックの耐圧強度を下回ることを基準とする。

表 6.1.2-12 応力緩衝性に対する指標および基準 (案)

設計要件	指標	基準
物理的緩衝性	緩衝材の圧密反力と地下水静水圧の合計	オーバーパックの耐圧強度を下回ること

第2次取りまとめ (JNC、1999) においては、緩衝材の間隙比 e と圧密応力 p' の対数の関係で表される圧密線 ($e\text{-log } p'$) が通常の土質材料と同様に直線関係で与えられるものとして、腐食膨

張後の緩衝材の間隙比から圧密反力が求められている。第2次取りまとめ後に実施された検討[7]からは、以下のような知見が得られている（図 6.1.2-24 参照）。

- ・ 圧密降伏応力を超過するまでの過圧密領域において、体積変化は概ね 0 のまま推移する。
- ・ 正規圧密状態において、 $e \cdot \log p'$ 関係における圧密線は非線形性（曲線状の関係）を示す。
- ・ ベントナイトの正規圧密状態における圧密線は Ca 型化や塩分濃度によらず唯一存在する。

小林ほか（2007）[19]は、上記のような特徴を示すベントナイトの正規圧密線について、次式で示す乾燥密度と圧密応力の関係でうまく表すことができることを示している。

$$\frac{\rho_d}{\rho_w} = 0.156 \ln p' + 1.45$$

ここに、 ρ_d [Mg/m³]は乾燥密度、 ρ_w [Mg/m³]は水の単位体積重量、 p' [MPa]は圧密応力である。本検討では、オーバーパックの腐食膨張による緩衝材の圧密反力を上式により算定する。その流れは以下のようになる。

オーバーパックの腐食代と腐食膨張率から膨張量を算定

⇒ 圧縮される緩衝材の体積変化量の算定

⇒ 圧縮後の緩衝材の体積から間隙比を算定

⇒ 上記の間隙比から乾燥密度（ベントナイト 100% の場合は有効粘土密度に相当）を算出

※ ケイ砂混合土の場合はここでさらにケイ砂混合率を用いて有効粘土密度に換算

$$\rho_e = \rho_d (1 - R_s) / (1 - \rho_d R_s / \rho_{ss})$$

⇒ 有効粘土密度から圧密反力を算定

$$p'_c = \exp\left(\frac{\rho_e - 1.45}{0.156}\right)$$

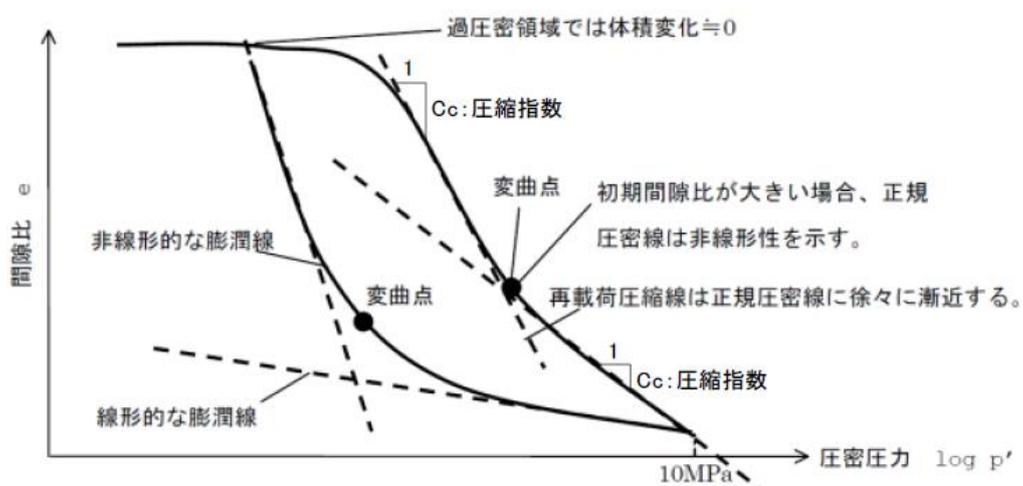


図 6.1.2-24 ベントナイトの $e \cdot \log p'$ 関係の模式図（笹倉ほか、2003）

なお、物理的緩衝性は、オーバーパックの設計とリンクしており、オーバーパックの厚さ（耐圧厚さ）が変われば物理的緩衝性が影響を受けることに留意が必要である。

ここで、オーバーパックの厚さが第2次取りまとめ(JNC、1999)と同様 190mm(腐食代 40mm)で、静水圧が 10MPa 作用する場合（硬岩、処分深度 1000m）を想定すると、第2次取りまとめの検討結果（図 6.1.2-25、図 6.1.2-26）から、オーバーパックの健全部 150mm を全て耐圧厚さとみなすと緩衝材からの反力の許容値はおよそ 17MPa になる。

設計においては、上述の式を用いて、この反力の許容値（オーバーパックの耐圧強度）を満足するような緩衝材の厚さと施工時の有効粘土密度 ρ_e の関係を求めることが必要となる。

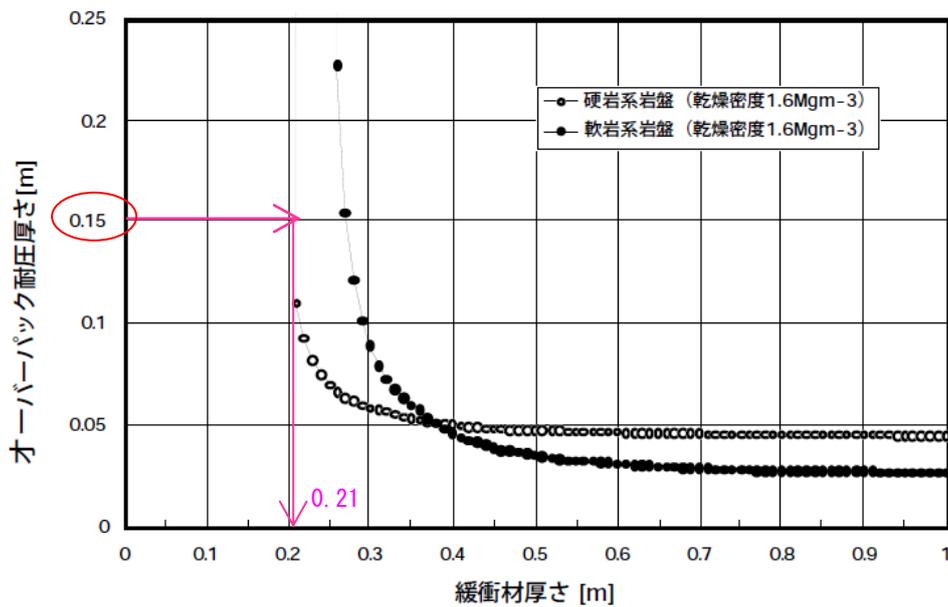


図 6.1.2-25 オーバーパック耐圧厚さと緩衝材厚さの関係（JNC、1999 に追記）

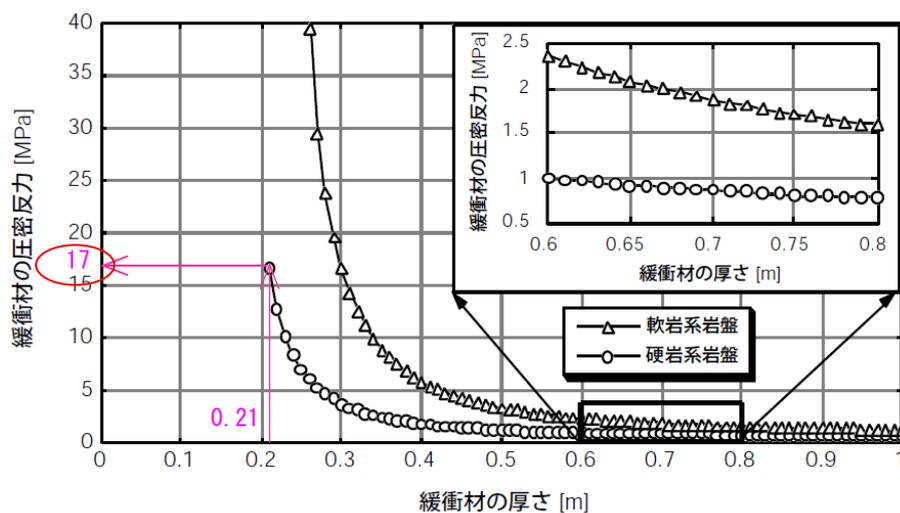


図 6.1.2-26 緩衝材厚さと緩衝材の圧密反力の関係（JNC、1999 に追記）

6) 製作施工性

製作施工性では、製作・施工が可能な有効粘土密度の上限値を規定する。

緩衝材の製作または施工試験の例を表 6.1.2-14 に示す。

表 6.1.2-13 製作施工性に対する指標および基準 (案)

設計要件	指標	基準*
製作施工性	製作または試験の実績 (乾燥密度)	1.9Mg/m ³ 以下 (ブロック) 1.8Mg/m ³ 以下 (締固め) 1.6Mg/m ³ 以下 (吹付け)

※) ベントナイト配合等は実施された施工試験時の条件 (次表参照) に基づくものであることに留意が必要

表 6.1.2-14 緩衝材の製作または例

方式	ベントナイト	製作または施工試験の結果
ブロック [20] (静的 締固め)	クニゲル V1 ベントナイト 70wt% +ケイ砂 30wt% (含水比 9%)	実施した全てのケース (10 ケース) で目標乾燥密度 1.9Mg/m ³ (有効粘土密度: 1.70Mg/m ³ 相当) 以上を達成し、ひび割れ、欠損などの異常のない高い品質の緩衝材ブロックが製作できた。
PEM[21] (動的 締固め)	クニゲル V1 ベントナイト 70wt% +ケイ砂 30wt% (含水比 18%)	製作後の緩衝材全体の平均乾燥密度は 1.79Mg/m ³ (有効粘土密度: 1.57Mg/m ³ 相当) で、目標乾燥密度 (1.8Mg/m ³) をわずかに下回った。内側枠の剛性不足により転圧力が放散したことが原因で、内側近傍以外では目標乾燥密度を満足。
吹付け[22] (SHOTCLAY 工法)	クニゲル V1 (ケイ砂 0) MX80 Milos Ca-bentonite Friedland Clay	吹付けは、クニゲル V1 で乾燥密度 1.6Mg/m ³ となる機械設定で行った。モンモリロナイト含有率が大きいほど締固め性能が悪いこと、層間陽イオンの種類は吹付けた材料の乾燥密度に影響しないことが分かった。

7) 微生物影響の防止

表 6.1.2-15 微生物影響防止に対する指標および基準 (案)

設計要件	指標	基準
微生物影響の防止	菌体数	増殖しないこと

谷口ほか(2001)では、オーバーパックスの腐食に影響を及ぼす代表的な嫌気性細菌のひとつである硫酸塩還元菌 (SRB) を対象として、固液比 (=ベントナイト/水比) をパラメータとしたベントナイト中での増殖試験による SRB の活性条件、活性が低下する条件の調査が行われている [23]。その結果、固液比が大きくなると硫酸塩還元菌の生菌数は低下し、1000 g/l 以上ではほとんど増殖できないとされている (図 6.1.2-27)。この実験結果に基づき、微生物影響を防止する緩衝材の有効粘土密度の下限値を設定する。

ベントナイトの土粒子密度 ρ_b とケイ砂の土粒子密度 ρ_s をそれぞれ 2.70g/cm³、2.64g/cm³ とし、

硅砂混合率 R_s を 30% として固液比 1000g/l に相当する乾燥密度 ρ_d を算出すると、

$$\rho_d = (\text{固液比}) / (\text{固液比} / \rho_b - 1000) = 0.73 \text{ g/cm}^3 = 0.73 \text{ Mg/m}^3$$

となる。

この乾燥密度 ρ_d を有効粘土密度 ρ_e に換算すると、

$$\rho_e = \rho_d (1 - R_s) / (1 - \rho_d R_s / \rho_s) = 0.557 \text{ Mg/m}^3$$

となる。

したがって、有効粘土密度の下限値は 0.557Mg/m³ となり、この値をそれぞれの地下水条件および Ca 型化に対して設定する。

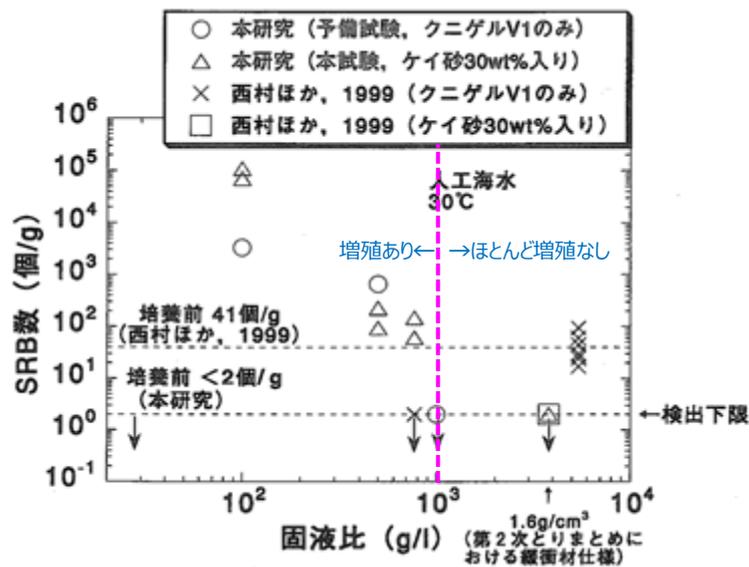


図 6.1.2-27 SRB 増殖試験結果 (谷口ほか、2001 に追記)

なお、SKB-TR-16-09[30]では、MX-80 等の 3 種類のベントナイトを対象に硫酸塩還元菌の活性に関する試験が実施されている。試験結果によれば、ベントナイトの種類による違いはあるものの微生物の影響を抑制するための湿潤密度の閾値は 1,740~1,880 kg/m³ の範囲にある。これに対応する乾燥密度はおよそ 1,300 kg/m³、間隙率は 30% (間隙比 0.43) 程度となり、例えば微生物の活動限界を間隙比で考えた場合、 $0.43 < 0.68$ (30%ケイ砂混合、乾燥密度 1.6Mg/m³ のクニゲル V1 相当) であり非常に厳しい制約条件になることから、このような知見を緩衝材の設計にどう取り入れるかは今後の課題といえる。

(2) 緩衝材の仕様範囲の例示と要件の再整理

1) 緩衝材の仕様範囲の例示

前述した各設計要件を満足する緩衝材の仕様の範囲について、想定する処分方式・施工方法ごとに図 6.1.2-28~図 6.1.2-30 に例示する。施工時の隙間は表 6.1.2-16 に示すように設定した。各図においては、緩衝材の厚さと密度の相関関係を示し、密度は膨潤前の有効粘土密度で統一した。なお、各図で例示した緩衝材の仕様範囲においては設計上の安全裕度は考慮していない。緩

衝材の仕様の範囲の設定にあたっては、表 6.1.2-17 に示す計算条件をおいた。その他の条件として、オーバーパックの仕様（形状、耐圧厚さ、腐食代、腐食膨張率等）は HLW 第 2 次とりまとめと同様とし、低透水性に関わる条件（ペクレ数<0.1）としては母岩の透水係数を 2E-10 m/s、動水勾配を 0.01、EDZ の透水係数を母岩の 10 倍とした。

表 6.1.2-16 処分方式・施工方法に対応して設定した施工時の隙間

処分方式	緩衝材の施工方法	隙間 (mm)	
		OP~緩衝材	緩衝材~岩盤 (埋戻材)
処分孔縦置き式	ブロック式	20	40
	ブロック+隙間充填ペレット	20	0 (空隙大)
	吹付け (無人施工)	0	0
横置き PEM 式	撒き出し・締固め	20	0
	吹付け (有人施工)	20	0
	吹付け (無人施工)	0	0

表 6.1.2-17 各設計要件に対して設定した基準

設計要件	計算条件 (基準値)		備考
低透水性	膨潤後の有効粘土密度の下限值	1.0 Mg/m ³	透水係数<1E-10m/s ※1
コロイドろ過性	膨潤後の有効粘土密度の下限值	0.8 Mg/m ³	
自己シール性	隙間間充填後の体積に対し、さらに膨潤可能な体積の割合 (膨潤余裕代)	0.1 [-]	
自己修復性	膨潤後の有効粘土密度の下限值	※2	
製作施工性	膨潤前の乾燥密度の上限值	1.6~1.9 Mg/m ³	施工法による※3
応力緩衝性	OP の耐圧厚さに対応する圧密反力の上限值	17 MPa	OP の仕様等は第 2 次とりまとめ同様※4
微生物影響防止	膨潤後の有効粘土密度の下限值	0.557 Mg/m ³	

※1) 母岩の透水係数を 2E-10 m/s、EDZ の透水係数を 2E-9 m/s、動水勾配を 0.01 として緩衝材中の地下水流速を理論解により求め、緩衝材の厚さに関わらずペクレ数<0.1 となる透水係数の上限として 1E-10m/s を設定した。

※2) 自己修復性は、基本的に自己シール性に含まれる (施工時の隙間を充填する膨潤機能を有することで、自ずと自己修復性を満足する) ものとする。

※3) 製作施工性では、製作・施工が可能な有効粘土密度の上限値を既往の実績から設定する。ここでは、クニゲル V1 (ケイ砂 30%混合) を対象とした施工試験の結果 (RWMC、2012 等) から、実現可能な乾燥密度をブロック式: 1.9 Mg/m³、撒き出し・締固め: 1.8 Mg/m³、吹付け: 1.6 Mg/m³ と設定した。

※4) オーバーパックの仕様 (形状寸法、腐食代、腐食膨張率等) は HLW 第 2 次とりまとめ同様とし、静水圧は 10MPa (処分深度 1000m) とする。

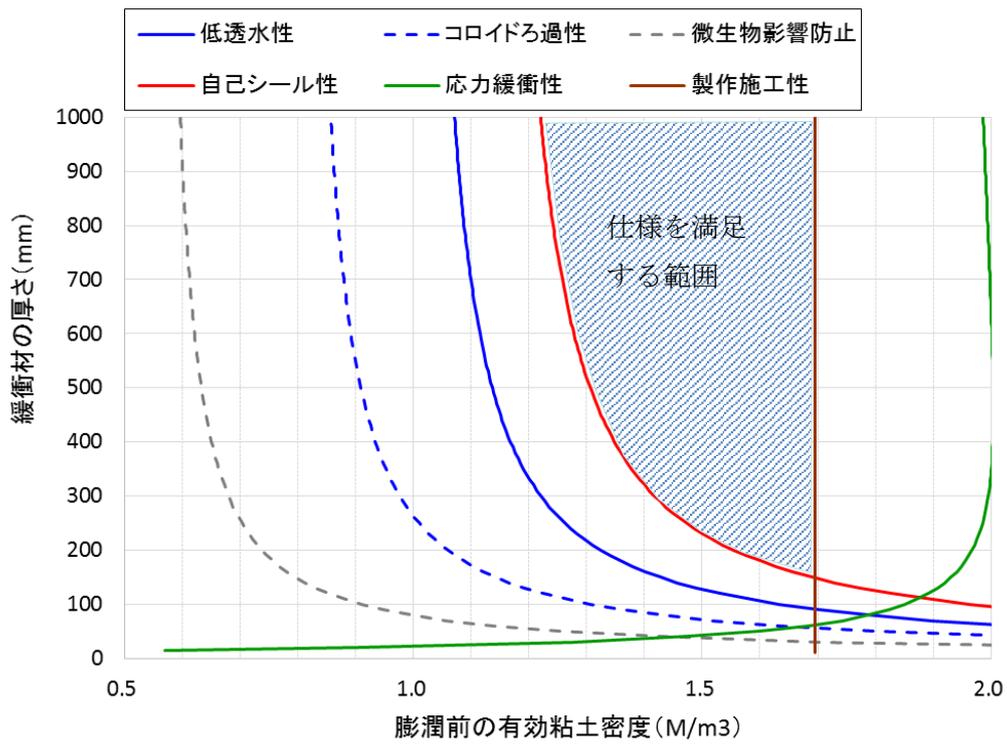


図 6.1.2-28 各設計要件に対する緩衝材の仕様範囲の例示 (「処分孔縦置き・ブロック式」)

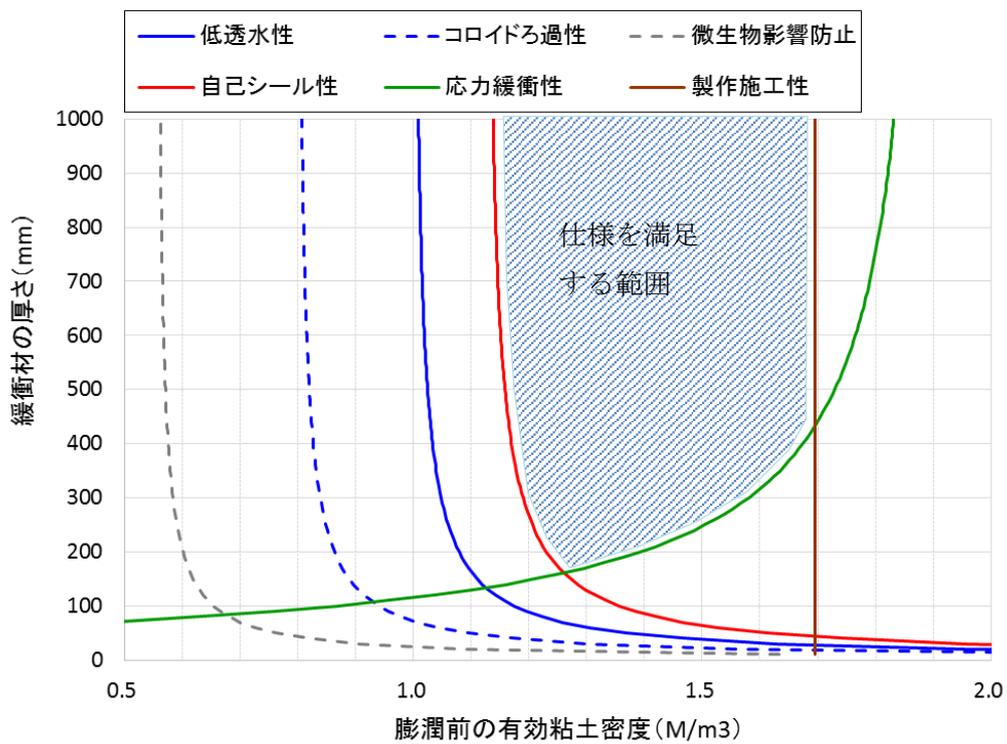


図 6.1.2-29 各設計要件に対する緩衝材の仕様範囲の例示 (「処分孔縦置き・ブロック+ペレット」)

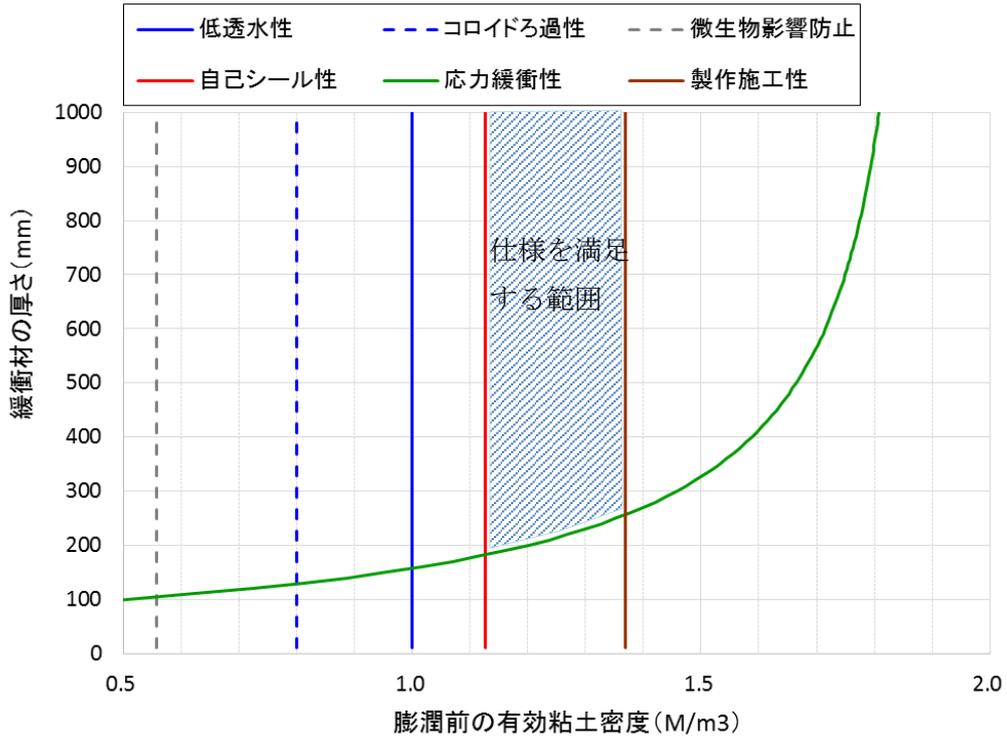


図 6.1.2-30 各設計要件に対する緩衝材の仕様範囲の例示
 (「処分孔縦置き・吹付け (無人施工)」)

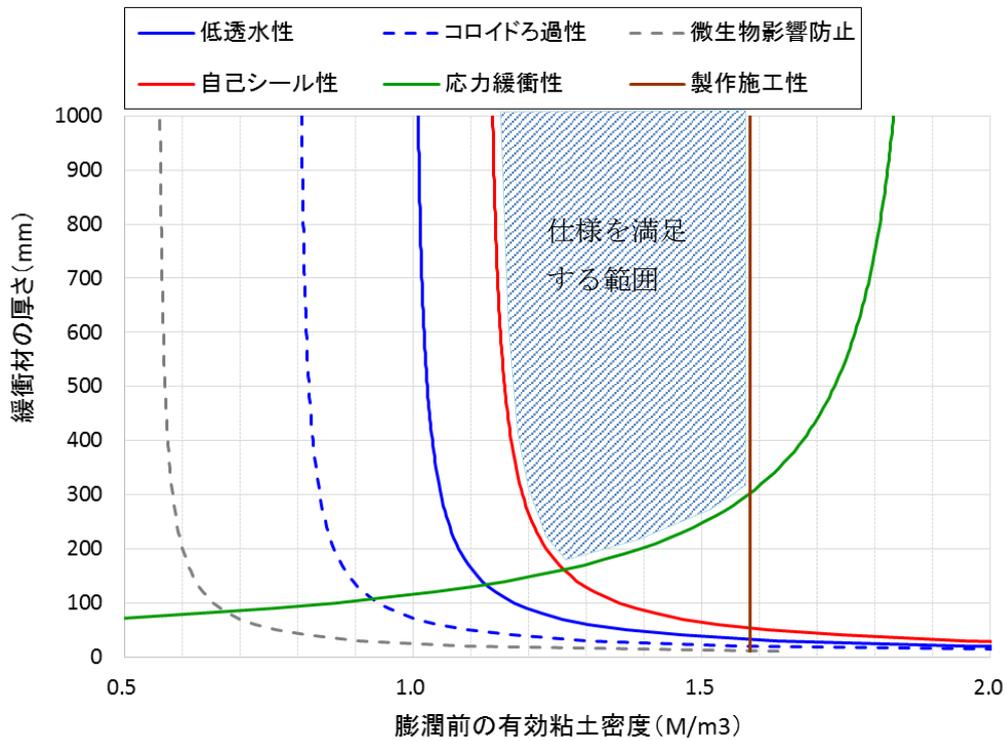


図 6.1.2-31 各設計要件に対する緩衝材の仕様範囲の例示
 (「横置き PEM・撒き出し締固め」)

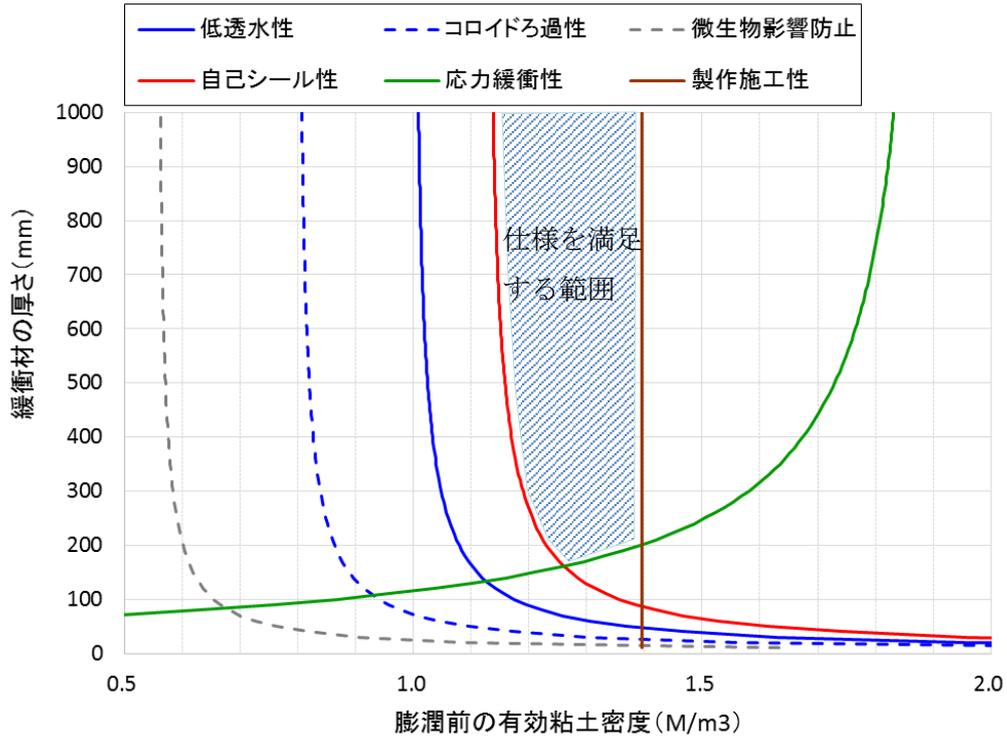


図 6.1.2-32 各設計要件に対する緩衝材の仕様範囲の例示(「横置き PEM・吹付け(有人施工)」)

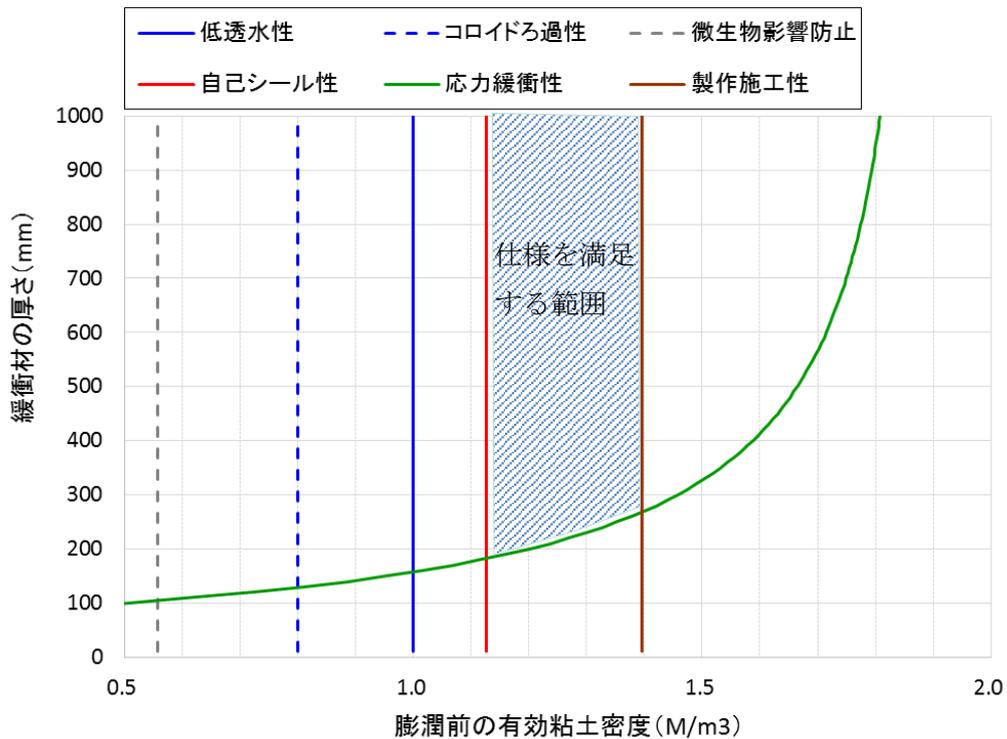


図 6.1.2-33 各設計要件に対する緩衝材の仕様範囲の例示(「横置き PEM・吹付け(無人施工)」)

2) 要件の再整理

1)の例示から、実質的な設計要件の絞り込みが可能と考えられる。

「低透水性」に対して規定される膨潤後の有効粘土密度の下限値は、母岩の透水係数などのサイト条件に依存し必ずしも常に上記試算例で用いた値 (1.0Mg/m^3) になるとは限らないが、同じく有効粘土密度の下限値で仕様範囲が規定される「コロイドろ過性」、「微生物影響の防止」(それぞれ 0.8Mg/m^3 、 0.557Mg/m^3) よりも大きいと想定される。また、自己修復性は自己シール性に包含される(自己シール性の「膨潤余裕代」を満足することにより、自己修復に必要な膨潤性能は満足される)と考えることができる。したがって、コロイドろ過性、自己修復性、微生物影響の防止は、満足すべき基準値の関係からは実質的な要件にならず、緩衝材の仕様は低透水性、自己シール性、応力緩衝性、製作施工性で決まるものと考えられる。再整理した緩衝材の設計要件を表 6.1.2-18 に示す。

表 6.1.2-18 再整理した設計要件と仕様の設計方法

設計要件	指標	仕様の設定方法
低透水性	ペクレ数	ペクレ数 Pe が 1 より十分小さくなるよう ($Pe < 0.1$) 膨潤後の緩衝材の透水係数を設定し、対応する密度の下限値を設定
自己シール性	膨潤余裕代 (隙間間充填後、さらに膨潤可能な体積の割合)	隙間の大きさに対して、緩衝材の膨潤量が余裕をもって充てられる密度と厚さを設定 (膨潤余裕代 > 0.1)
応力緩衝性	OP の耐圧強度と緩衝材からの作用荷重の関係	有効粘土密度と圧密応力の関係式から求められる OP への圧密反力が、静水圧等 OP に作用する荷重と合わせ、OP の耐圧強度を下回るように膨潤後の密度と厚さを設定
製作施工性	施工可能な密度	施工試験に基づき、施工可能な密度の上限値を設定

(3) 緩衝材流出への対応

既述のとおり、小林ほか (2014) 緩衝材流出試験により、エロージョン質量と地下水総流量の関係が整理されている。ここでは、この知見をふまえたエロージョンの設計への反映方法について検討する。

鈴木ほか (2014) [24]では、緩衝材流出への対応として、①施工する緩衝材の密度を高め、流出しても所定の機能を満たすこと(処分孔当たりの緩衝材の乾燥質量 M を大きくする)、流出量を小さくするために工学的対策として、②閉鎖するまでの時間を短くすること、さらに③止水工法や地下水低下工法等で流量を小さくすることが示されている (図 6.1.2-34)。

緩衝材流出を考慮した設計としては、設計条件として、許容湧水量を設定し、設計裕度を見込む形で緩衝材の密度に上乘せする方法を採用する (上記①に相当)。

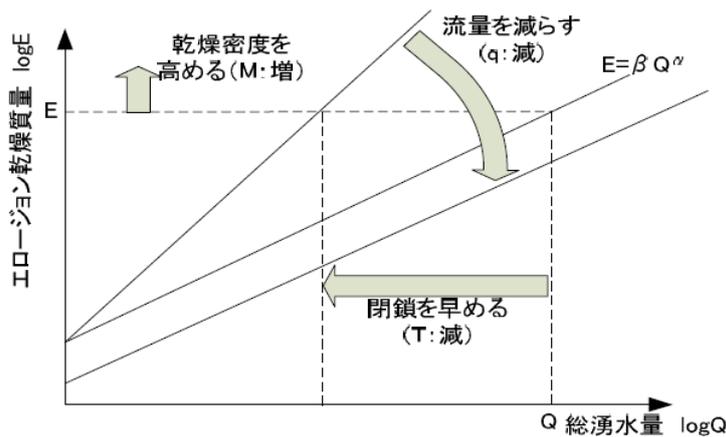


図 6.1.2-34 流量とエロージョン量との関係における湧水対策の方法（鈴木ほか、2014）

以下に計算例を示す。なお、総湧水量とエロージョン量の関係式は、小林ほか（2014）に示されるクニゲル V1（ケイ砂 30%混合、ブロック）の試験結果に基づく下式を用いた。

$$m_s = 0.08 \times (M_w)^{0.85}$$

ここに、 m_s : エロージョン量[g]、 M_w : 総湧水量[L]

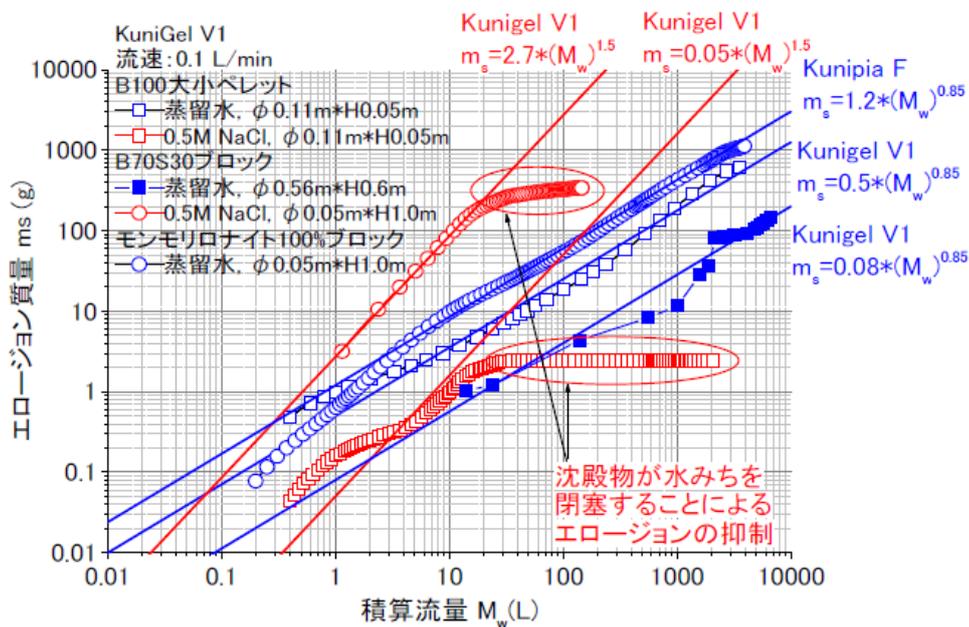


図 6.1.2-35 エロージョン質量と総流量の関係（再掲）

人工バリアの寸法を HLW 第 2 次とりまとめ同様とし、施工時の隙間（OP~緩衝材間：20mm、緩衝材~岩盤間：40mm）を考慮して膨潤後の乾燥密度を 1600kg/m³ とすると、人工バリア 1 体あたりの緩衝材施工量は 20,075kg となる。

ここで、

- ・許容湧水量として 1～10L/min
- ・湧水期間として 1～10 年

の範囲を考えると、設計上考慮すべき総湧水量（許容湧水量×湧水期間）は、525,600L～52,560,000L となり、上式よりエロージョン量は $m_s = 5.8\text{kg} \sim 292\text{kg}$ と算出される。このとき、緩衝材の流出を考慮した残存割合は、 $(\text{施工量} - \text{エロージョン量}) / \text{施工量} = 99.9\% \sim 98.5\%$ の範囲となる。

したがって、例えば上記が 98.5% の場合、流出分を見込んで施工時の緩衝材密度を $1 / 0.985 = 1.01$ 倍以上にしておく必要がある。

ただし、上記関係式は室内試験の結果に基づくものであり、実際のエロージョン量は現地の状況や施工手順に応じて変化することが考えられるため、上乘せする緩衝材の密度は余裕をもって安全側に設定しておくべきであると考えられる。

(4) 緩衝材の仕様設定方法および設計フロー

以上の検討をふまえた緩衝材の設計フローを図 6.1.2-36 に示す。

フロー図に示される設計要件と裕度に対応した緩衝材の仕様範囲の設定例を図 6.1.2-37 に示す。

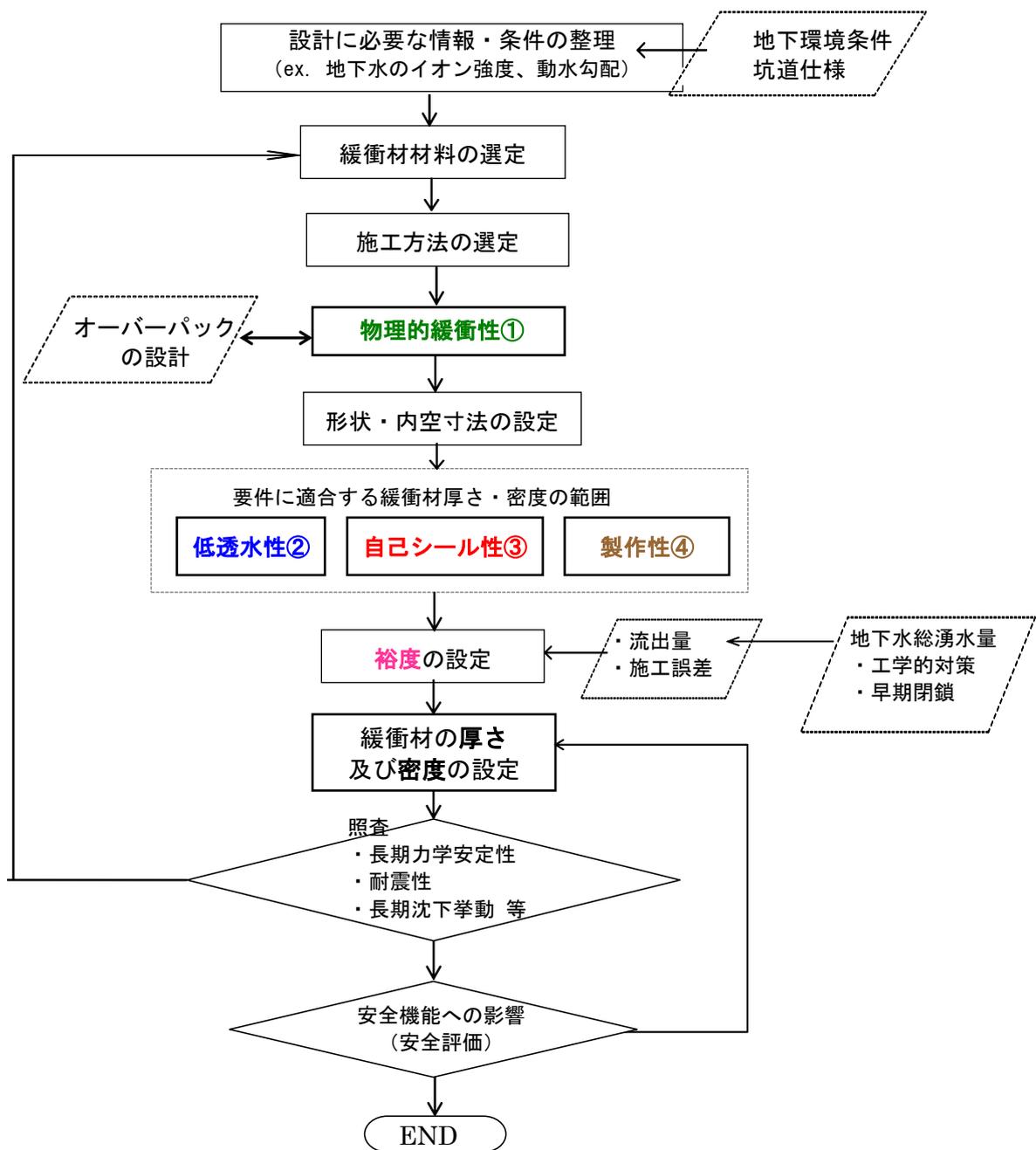


図 6.1.2-36 緩衝材の設計フロー

<算定条件>
 ・施工時の隙間：
 20mm（内），0（外）
 ・OP 外径 41mm、腐食代 40mm
 ・母岩透水係数：2E-10[m/s]
 ・巨視的動水勾配：0.01
 ・許容湧水量：5L/min
 ・処分深度：1000[m]
 etc.

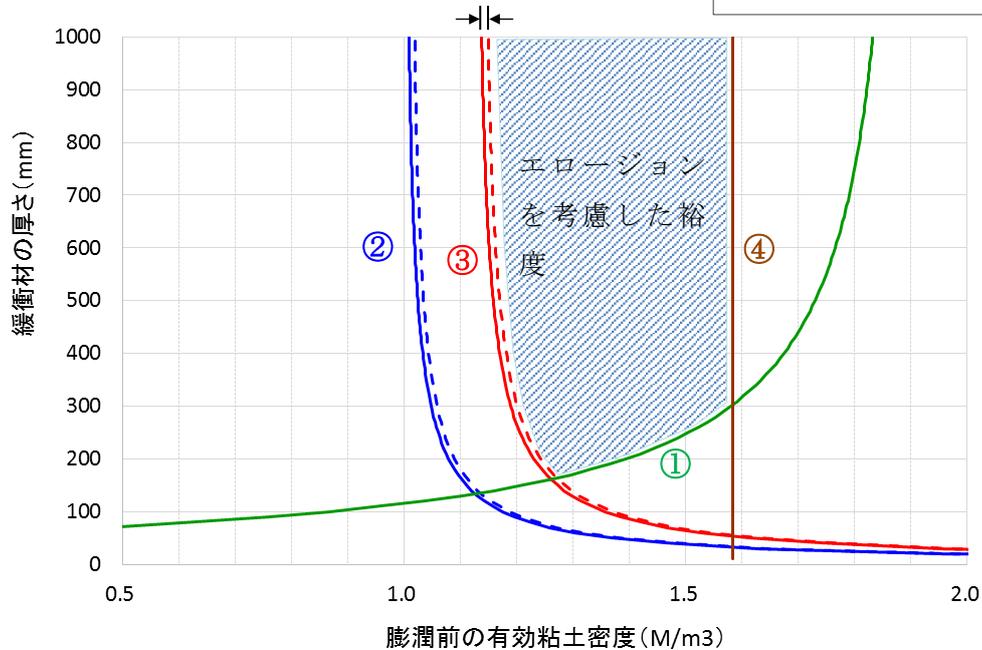


図 6.1.2-37 緩衝材の仕様範囲の設定例（PEM・撒出し締固め式の例）

(5) 湧水の影響を考慮した緩衝材の設計・施工全体フロー（案）構築に向けて

前述した緩衝材に求められる設計要件を踏まえ、緩衝材の設計フローを構築した。その際、緩衝材の設計・施工において重要課題となる湧水対策については地質環境に依存するため、主に与条件扱いとした。

しかしながら、緩衝材の設計・施工の信頼性を高めていくためには湧水の影響を取り込むことが要求されている。ここでは、前述した「緩衝材の設計フロー」に以下の観点を加味する考え方を整理した。

- ✓ 定置時の課題となる湧水対策（ex.許容湧水量）
- ✓ 定置後（閉鎖まで）の課題となる湧水によるエロージョン対策（ex.許容エロージョン量）

本検討での留意点／特記事項を以下に示す。

- ・ 例えば縦置きの場合、「緩衝材の設計」は処分孔のサイズを決める行為であるため、「緩衝材の設計フロー」においては処分孔サイズに影響を与える湧水対策も含めることとする。
- ・ 本検討は定置時及び定置後の課題を、最初の設計段階から考慮するものである。
- ・ 現段階では、地質環境の不確実性（施工時の情報に基づく設計変更など）は考慮していな

い。

- 本検討フローは別途検討が進められている処分場の設計フローと、検討手順などにおいて整合を図る必要がある。
- 本検討フローでは処分場を含めた設計全体における最適化の観点を含んでいない。

1) 湧水の影響を考慮した緩衝材の設計・施工全体フロー（案）

湧水の影響を考慮した緩衝材の設計・施工全体フロー（案）は、検討を進めてきた①緩衝材の性能に係わる設計フローに、許容湧水量の関連で②縦置き・定置時の課題に対する設計・施工フローと許容エロージョン量の関連で③縦置き・定置後の課題に対する設計・施工フローを加えたものである。

ここで①緩衝材の性能に係わる設計フローには、「厚さ」及び「密度」において許容エロージョン量を事前に設定することや、「施工方法」においては湧水対策（許容湧水量の検討など）を含むものとし、処分孔サイズの設計フローの役割も担うものである。

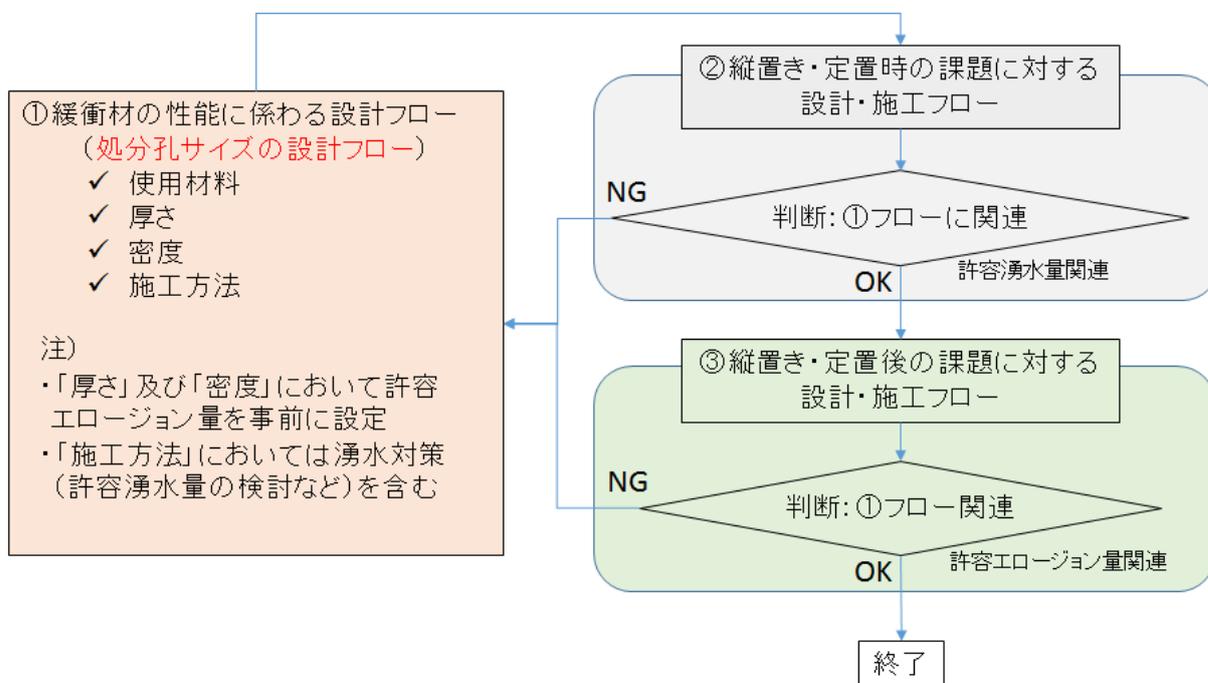


図 6.1.2-38 湧水の影響を考慮した緩衝材の設計・施工全体フロー（案）

2) 縦置き・定置時の課題に対する設計・施工フロー

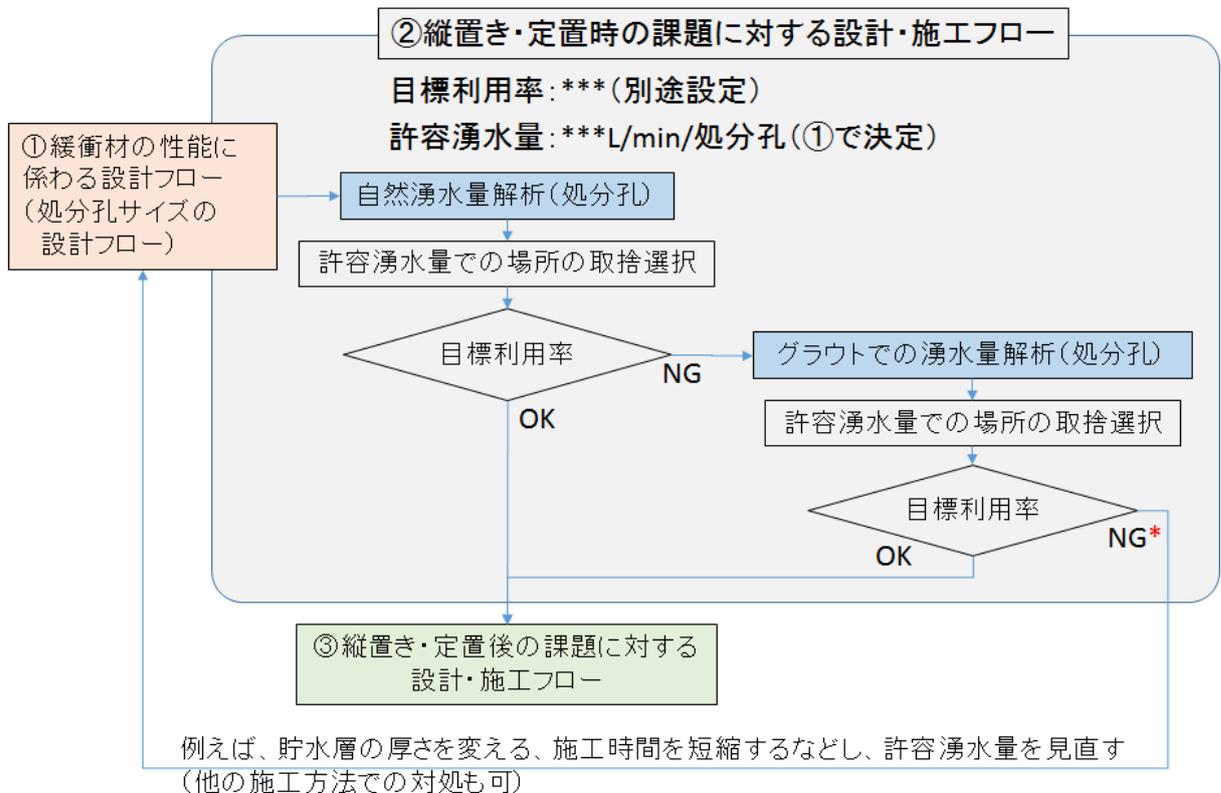
②縦置き・定置時の課題に対する設計・施工フローは、図 6.1.2-39 に示すように、先ず別途業務において目標利用率（処分場の施設レイアウトにおいて、どの程度の割合で対象エリアを使用する必要があるか）と①緩衝材の性能に係わる設計フローで決定した許容湧水量を踏まえ、各処分孔での自然湧水量解析を実施し、許容湧水量での場所の取捨選択を行い、その結果が目標利用率を満足しているか判断する。

目標利用率を満足していれば次段階の③縦置き・定置後の課題に対する設計・施工フローに進

み、もし満足していなければ工学的対策としてグラウトなどを実施することとし、各処分孔でのグラウトでの湧水量解析を実施し、同様に許容湧水量での場所の取捨選択を行い、その結果が目標利用率を満足しているか判断する。

ここで目標利用率を満足していれば次段階の③縦置き・定置後の課題に対する設計・施工フローに進み、もし満足していなければ①緩衝材の性能に係わる設計フローに戻り、例えば、貯水層の厚さを変える、施工時間を短縮するなどし、許容湧水量を見直す(他の施工方法での対処も可)。

本検討フローの対象ではないが、許容湧水量の見直しが困難であれば、目標利用率(施設サイズ)を見直すこともありえる。



*本検討フローの対象ではないが、許容湧水量の見直しが困難であれば、目標利用率(施設サイズ)を見直すこともありえる。

図 6.1.2-39 ②縦置き・定置時の課題に対する設計・施工フロー

3) 縦置き・定置後の課題に対する設計・施工フロー

③縦置き・定置後の課題に対する設計・施工フローは、図 6.1.2-40 に示すように、①緩衝材の性能に係わる設計フローで決定した許容エロージョン量を踏まえ、埋戻し手順及び時期を検討した上で、それらを踏まえた処分孔での湧水量解析を行い、許容エロージョン量を満足しているか判断する。

許容エロージョン量を満足していれば検討は終了となる。もし満足していなければ①緩衝材の性能に係わる設計フローに戻り、「厚さ」及び「密度」において許容エロージョン量の見直しを

行う。

本検討フローの対象ではないが、許容エロージョン量の見直しが困難であれば、埋戻し手順及び時期を見直すこともありえる。

以上が、「緩衝材の設計フロー」に湧水に対する観点を加味した緩衝材の設計・施工の考え方である。

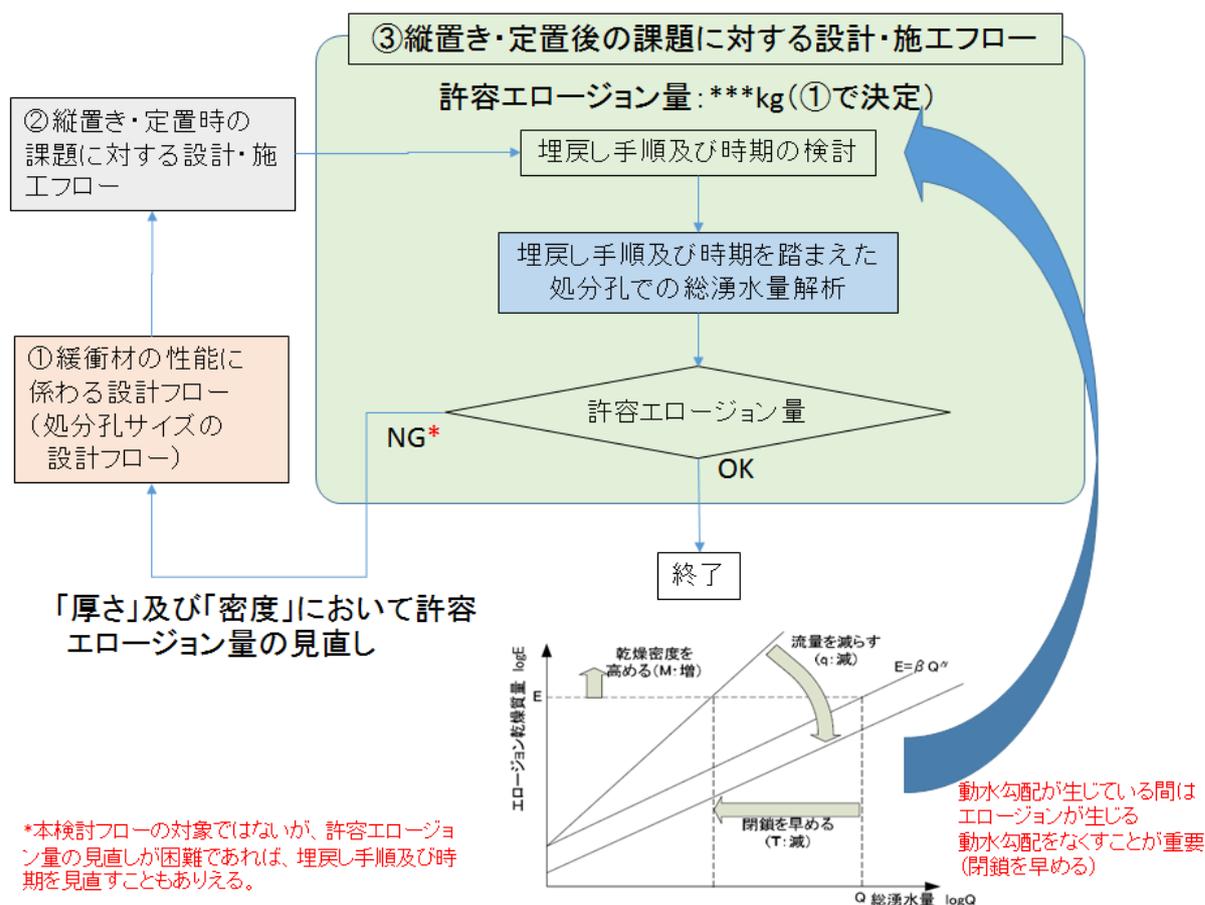


図 6.1.2-40 ③縦置き・定置後の課題に対する設計・施工フロー

6.1.3 複数材料を考慮した緩衝材の低透水性に関する指標の検討

ここでは、緩衝材としてクニゲル V1 以外にも MX-80 等の複数材料を使用する可能性を考慮し、ベントナイト材料の種類によらず統一的に適用が可能な指標について検討する。また、緩衝材の要件として重要な低透水性に着目して検討する。

(1) 実測データに基づく検討

1) 指標の候補

地盤工学会ほか (2016) [25]では、ベントナイト系材料の透水係数に関する指標として以下が

挙げられている。

- ・有効粘土密度
- ・有効モンモリロナイト密度

2) 実測データの整理

有効モンモリロナイト密度については、クニゲル V1 を対象に、有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係を混合率ごとに示している（図 6.1.3-1）。図より、ケイ砂混合率が低い場合は有効モンモリロナイト乾燥密度に対する透水係数の感度が高い傾向があるが、混合率が高い場合には有効モンモリロナイト乾燥密度に対する透水係数の感度が低い傾向が示されている。

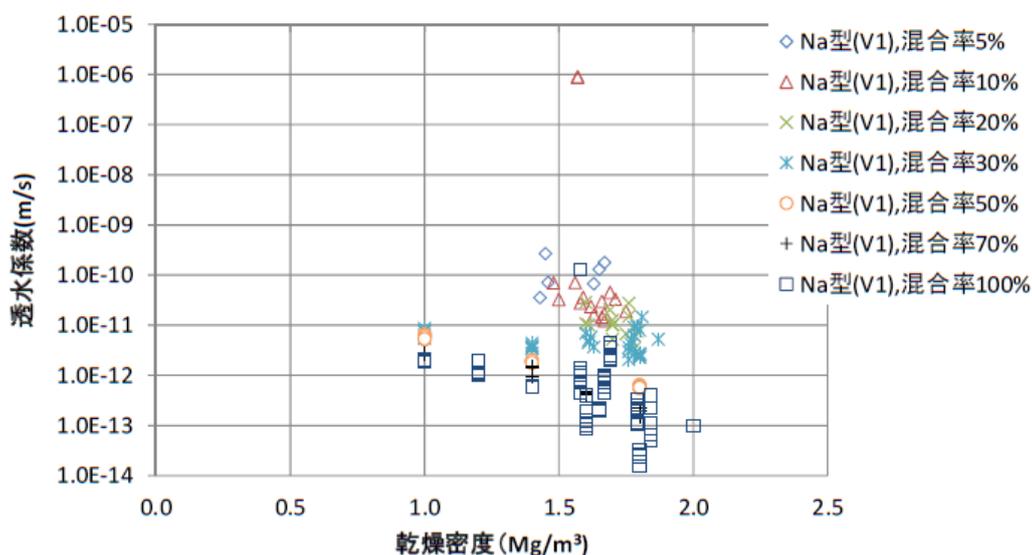


図 6.1.3-1 有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係（地盤工学会ほか、2016）

上記の検討は、クニゲル V1 を例にとり、ケイ砂混合率の異なる材料に対して透水係数が統一的に表現できるかどうかについて着目したものと見える。

一方、クニゲル V1 以外の海外産を含めた複数のベントナイト材料について、有効モンモリロナイト密度で透水係数が統一的に表現できる可能性について検討した。この際、ベントナイト 100%材料（ケイ砂混合なし）を対象に透水係数の実測データに関する文献調査を実施し[26][27][28][29]、モンモリロナイト含有率の異なる材料の透水係数を有効モンモリロナイト密度で整理した。

整理にあたっては、間隙水のイオン強度[mol/L]を考慮して以下の分類を設けた。

- ・蒸留水（イオン強度≒0）
- ・イオン強度が比較的小さい間隙水（ $0 < \text{イオン強度} \leq 0.5$ ）
- ・イオン強度が比較的大きい間隙水（ $0.5 < \text{イオン強度} \leq 1.0$ ）

図 6.1.3-2～図 6.1.3-4 に有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係を示す。

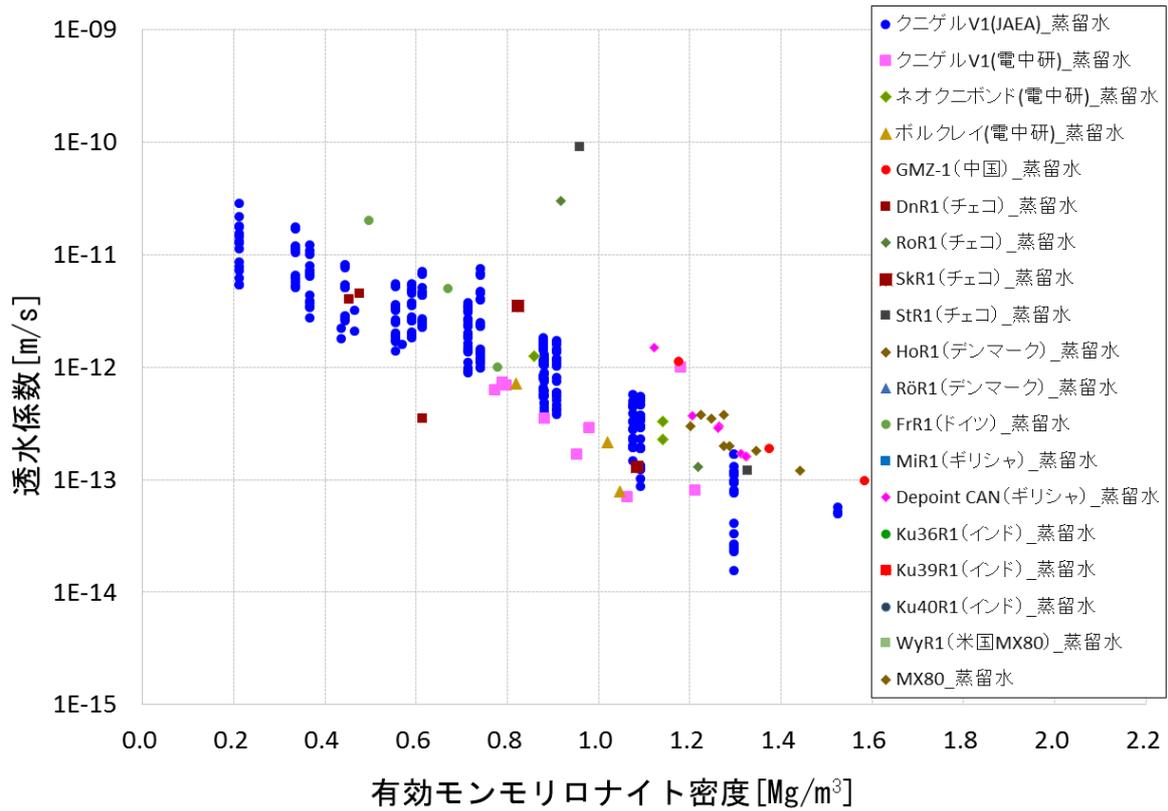


図 6.1.3-2 有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係 (イオン強度=0)

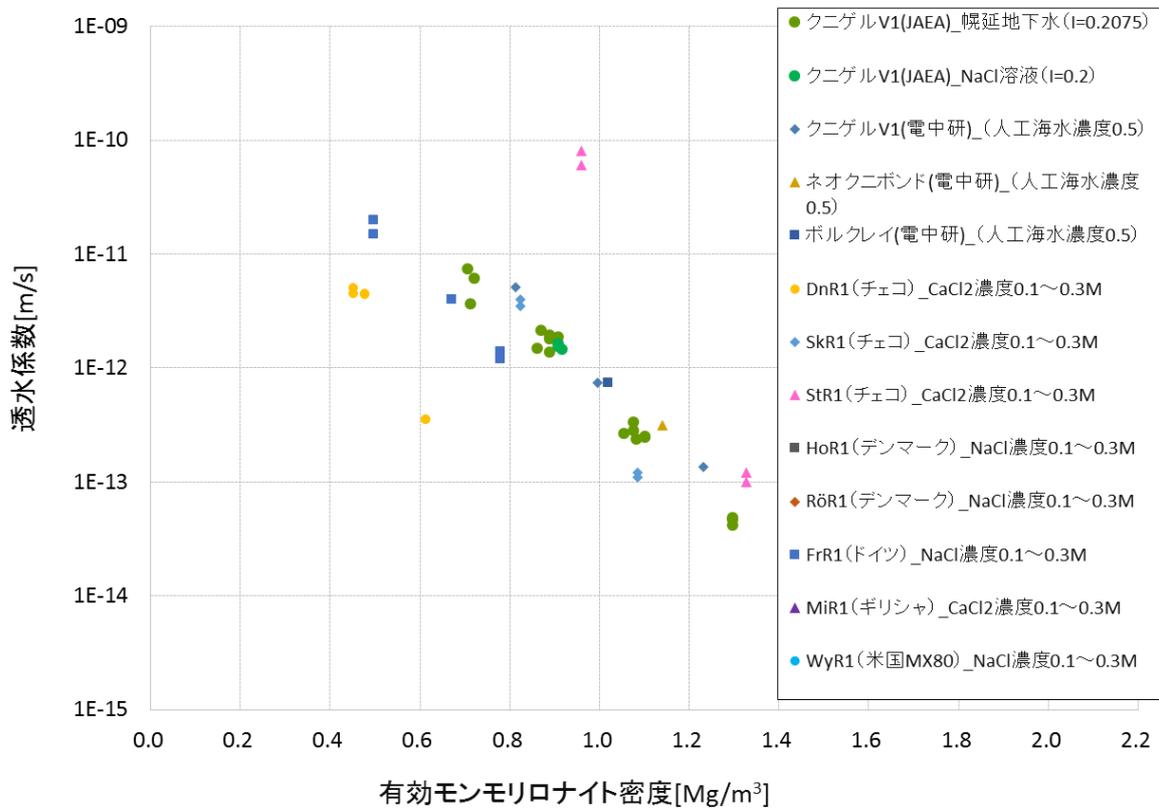


図 6.1.3-3 有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係 (0<イオン強度≤0.5)

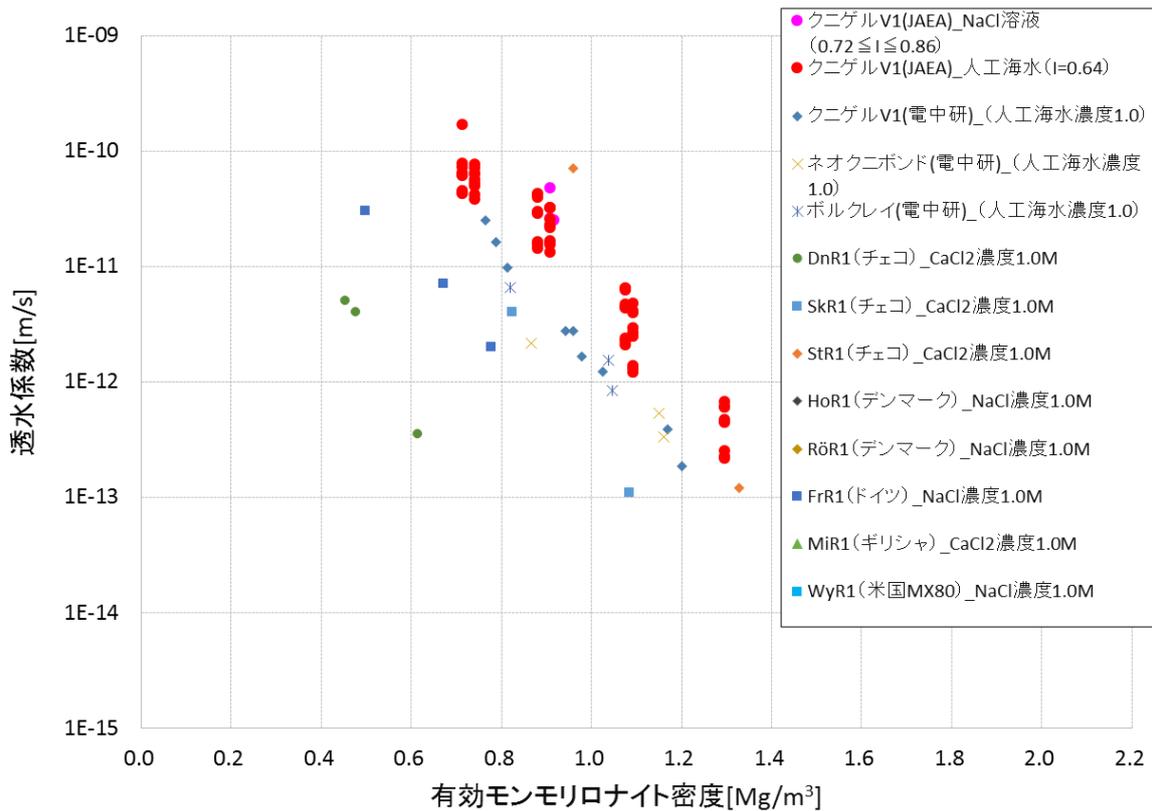


図 6.1.3-4 有効モンモリロナイト乾燥密度と透水係数の関係 (0.5<イオン強度≤1.0)

図 6.1.3-2 の蒸留水のプロットを見ると、同じクニゲル V1 のデータでも 1 オーダー程度のバラつきがあるが、このバラつきの中に他のベントナイトのデータも概ね包含されており、有効モンモリロナイト密度で一義的に評価できる可能性が見受けられる。一方、図 6.1.3-2 の液相のイオン強度が比較的高い場合のデータを見ると、データによってイオン強度が若干異なることを差し引いても、ベントナイト毎に透水性に違う傾向があることが見てとれる。

このことを鑑みると、「ベントナイトの種類によらず有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係が整理可能」とは必ずしも言い切れない。換言すると、少なくとも「低透水性」の観点において、有効モンモリロナイト密度は緩衝材設計の際の統一的な指標には適さないことが示唆される。

このことを確認するため、以下では Kozeny-Carman 則 (以下、KC 則とも記す) に基づく透水係数の整理を行い、上記について考察する。

(2) Kozeny-Carman 則による整理

KC 則は下式で表される。

$$k = \frac{1}{c} \frac{\rho_w g}{\mu} \frac{1}{S_v^2} \frac{e^3}{1+e}$$

$$= \frac{1}{c} \frac{\rho_w g}{\mu} \frac{1}{(3.6 \times 10^6 \times w^* \times \rho_d)^2} \frac{\left(\frac{\rho_s}{\rho_d} - 1\right)^3}{\rho_s / \rho_d}$$

ここに、 k は透水係数[m/s]、 c は形状係数[-]（通常 5）、 ρ_w は地下水の重量密度[kg/m³]、 g は重力加速度[m/s²]、 μ は水の粘性係数[Pa・s]、 S_v は比表面積[m²/m³]、 e は間隙比[-]、 ρ_d は乾燥密度[kg/m³]、 ρ_s は土粒子密度[kg/m³]、 w^* は2層膨潤含水比[-]である。

2層膨潤含水比は、図 6.1.3-5 に示すような1次粒子間隔が水分子2個分の状態（2層膨潤状態）になる含水比であり、ベントナイトの鉱物組成（モンモリロナイト含有率など）に依存する。また、2層膨潤含水比は乾燥密度とは独立に決まるものである。

したがって、ベントナイト材料が異なると2層膨潤含水比 w^* が異なるため同じ有効粘土乾燥密度でも透水係数は異なる値になる。また、KC則の式の形から、有効モンモリロナイト密度（式には陽に含まれないが、2層膨潤含水比 w^* と乾燥密度 ρ_d に関係する）が同じであっても透水係数は異なるものになると考えられる。

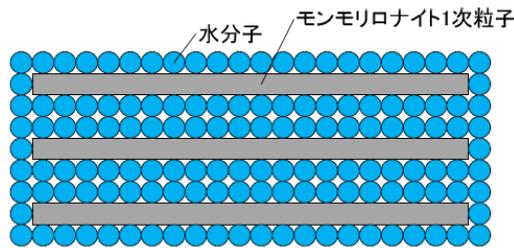


図 6.1.3-5 2層膨潤状態のイメージ（小林ほか、2015）

また、JAEA 緩衝材データベースのクニゲル V1（人工海水）の透水係数をプロットし、これに KC 則に基づく評価式（ $w^*=0.19$ ：既往の研究成果[15]）を加えたものを図 6.1.3-6 に示す。左図が横軸を乾燥密度にとったもので、右図が有効粘土密度である。この図より、乾燥密度でプロットした場合は評価式と実測値によい相関があるが、有効粘土密度でプロットした場合は、有効粘土密度の小さい領域において実測値が評価式を下回る傾向がみられる。これらのデータはケイ砂混合率の高いデータであり、有効粘土密度が小さいにもかかわらず透水係数が小さくなる理由は、ケイ砂が間隙水の通過する有効断面積を減少させているためと考えられる。KC 則に基づき透水係数を評価する場合は、取り扱うデータのケイ砂混合率の大小に留意する必要がある。

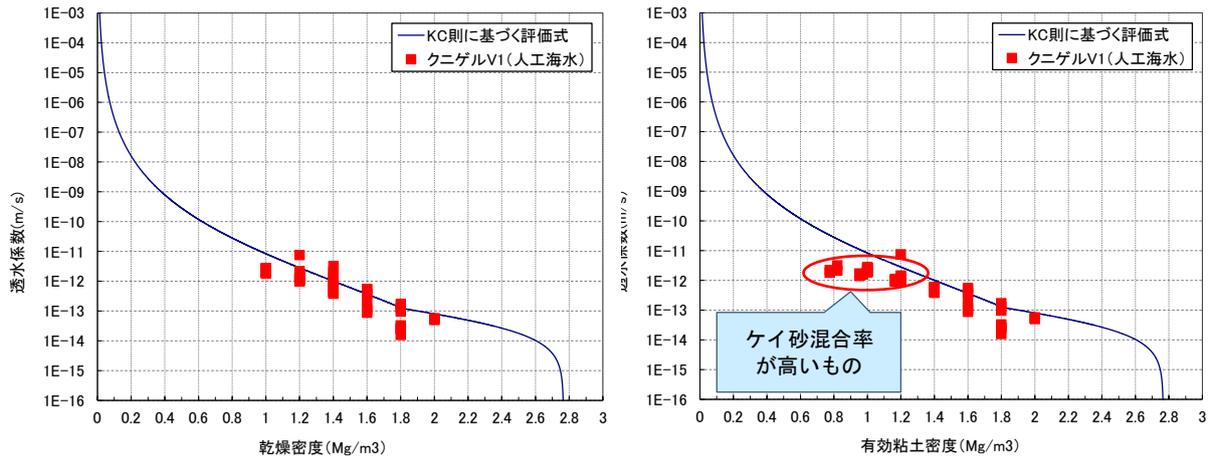


図 6.1.3-6 KC 則と実測値の比較 (Na 型モンモリロナイト)

6.2 設計に必要なデータに関する検討

6.1.2 で整理・検討した設計要件等について、NUMO がこれまでに公表し整理されているデータおよび、これまでセンターやその他関連機関で取得されたデータを反映し、データの過不足や信頼性について整理する。これらの整理ではクニゲル V1 以外のデータについても検討を加える。

6.2.1 各設計要件に対するデータの充足性

- 低透水性

クニゲル V1 以外の海外産のベントナイトでも、データはそれなりに取得されている。ただし、データのばらつきが大きいいためその取扱い方法について検討が必要である。

- コロイドろ過性

クニゲル V1 については、海水系地下水条件や Ca 型化ベントナイトに対するデータの蓄積が不十分であるが、降水系のデータを用いることが保守的であることから、現時点でデータの拡充が求められるわけではない。今後は、ベントナイトの種類を選択肢を広げるため、海外産ベントナイト材料の試験データを整理する必要がある。

- 製作施工性

海外産ベントナイトも含めて、製作性の可否に関する実証を今後積み重ねる必要がある。

施工時に必要となる隙間の大きさは緩衝材の膨潤後の性能と関連するため、施工方法ごとに施工試験により確認していく必要がある。

- 自己シール性

ベントナイトの種類を選択肢を広げるため、クニゲル V1 以外のベントナイトに対しても密度

～最大膨潤率の関係を取得する必要がある

- 物理的緩衝性

ベントナイトの種類を選択肢を広げるため、クニゲル V1 以外のベントナイトに対しても圧密特性を取得する必要がある

- 微生物影響の防止

前節の検討で用いたデータは、微生物として硫酸塩還元菌（SRB）を対象とし、人工海水を用いたクニゲル V1 のデータである。降水系地下水環境下でのデータが不足しているとともに、微生物種類の違いに対するデータやベントナイトの Ca 型化に対するデータが不足しているといえる。

SKB (2017) [29]では、3 種類のベントナイト：「MX-80」、「Asha」、及び「Calcigel」を対象とした室内試験により、湿潤密度（完全飽和状態）が 1,500～2,000 kg m⁻³ の範囲における微生物による硫化物生成の活性について調べられている（図 6.2.1-1）。

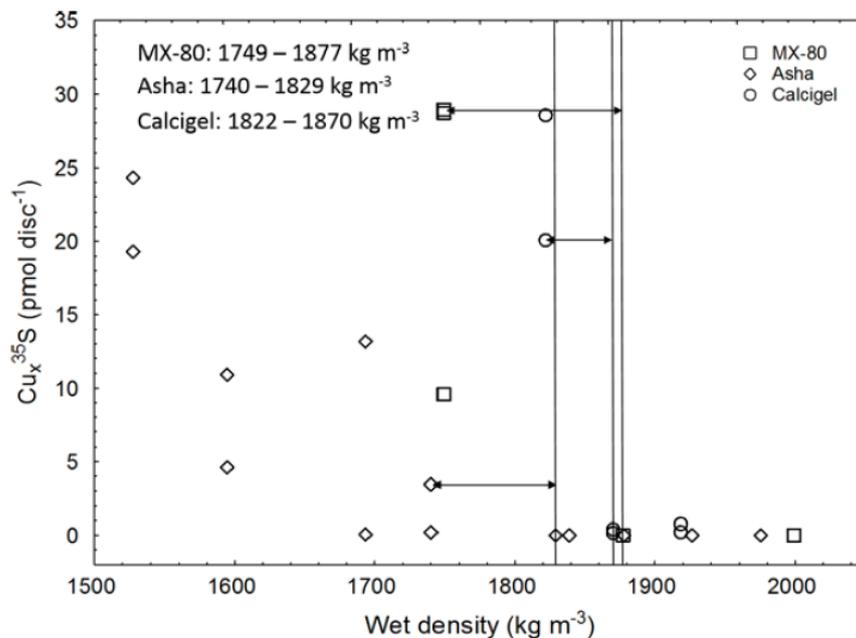


Figure 4-1. Accumulated Cu_x³⁵S on copper discs (pmol) over wet density. The respective intervals where sulphide-production shifts from high to low are indicated with arrows. The corresponding analysed wet density intervals are inserted.

図 6.2.1-1 ベントナイト密度の湿潤密度と微生物活動に関する SKB の試験結果

図に示すように、3 種類のベントナイトに対して分析された硫化物生成の活性は、湿潤密度が 1,740～1,880 kg/m³ の範囲で高い領域から低い領域へ遷移している。ここで仮に、微生物活動を抑制するための各ベントナイトの湿潤密度の閾値を 1850 kg/m³ とすると、上記報告書に記載された乾燥密度（計画値）との対応は以下のとおりである。

- MX-80 : 1,328 kg/m³
(湿潤密度 1750 kg/m³ および 1900 kg/m³ に対応する乾燥密度を線形補間)
- Asha : 1,300 kg/m³
- Calcigel : 1,333 kg/m³

湿潤密度が完全飽和状態のものとするれば、上記の各密度から、それぞれのベントナイトの間隙比および間隙率は以下のとおりとなる。

- MX-80 : 間隙比 0.39 (間隙率 28%)
- Asha : 間隙比 0.43 (間隙率 30%)
- Calcigel : 間隙比 0.39 (間隙率 28%)

上記の結果は、金属材料の腐食を防止／抑制するために微生物影響を防止する観点から、ベントナイト緩衝材の間隙比を 0.4 程度 (間隙率 30%程度) 以下に保つ必要がある可能性を示唆しているものといえる。

6.2.2 緩衝材の透水性に関するデータのばらつきと安全裕度

緩衝材の設計要件のうち、バリア機能 (移流による移行抑制機能) の確保の観点から重要となる低透水性については、透水係数データが材料の違い等によって大きなばらつきが見られる。ここでは、透水係数に絞ってデータを整理し、データの充足性、安全裕度、ばらつきの観点から検討する。

(1) データのばらつきの整理

比較的データが多く取得されているクニゲル V1 について、有効粘土密度と透水係数データの関係を図 6.2.2-1 (蒸留水) および図 6.2.2-2 (人工海水) に示す。各図においては、データのばらつきをみるため指数近似による近似曲線 (平均値) と $\pm 2\sigma$ の曲線もあわせて示した。各図より、以下のことが示唆される。

- クニゲル V1 では蒸留水に対しては比較的多くのデータが取得されているが、人工海水の低密度領域のデータがやや不足している。
- 透水係数のデータにはばらつきがあり、平均値+ σ もしくは平均値+ 2σ 程度の範囲を考慮した設計 (密度の余裕) が必要と考えられる。

なお、前述した通り、ケイ砂混合率の異なる材料の透水係数データを KC 則で整理すると、ケイ砂混合率の高い材料は有効粘土密度が小さい領域で近似値より小さい透水係数を示す傾向がある。図 6.2.2-1 および図 6.2.2-2 ではケイ砂混合率の異なるデータをあわせて表示しているが、KC 則を用いて有効粘土密度で整理する場合には、取り扱うデータのケイ砂混合率の大小に留意

する必要がある。

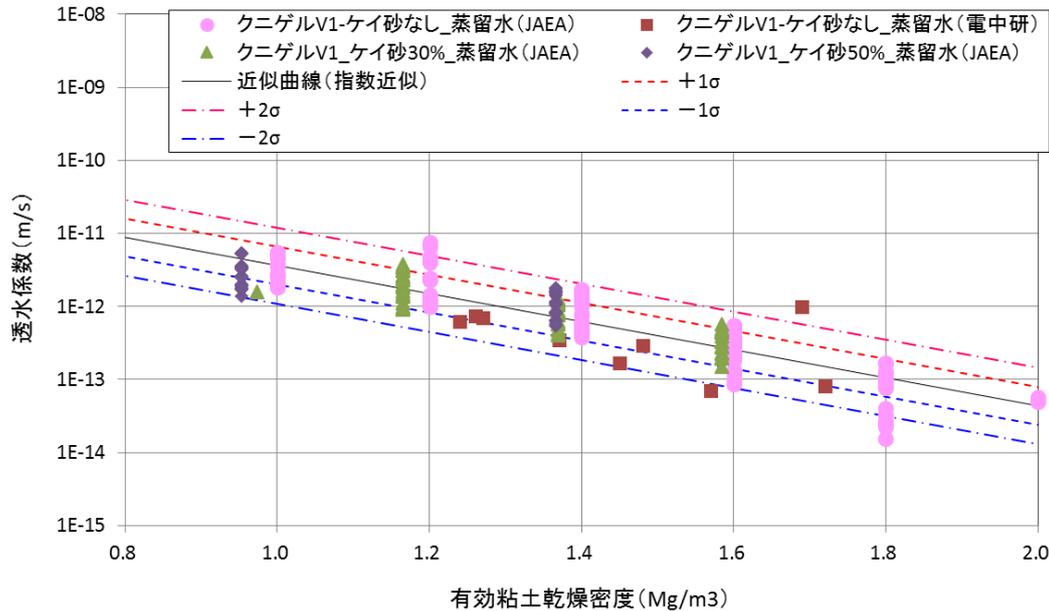


図 6.2.2-1 有効粘土密度と透水係数の関係 (クニゲル V1、蒸留水)

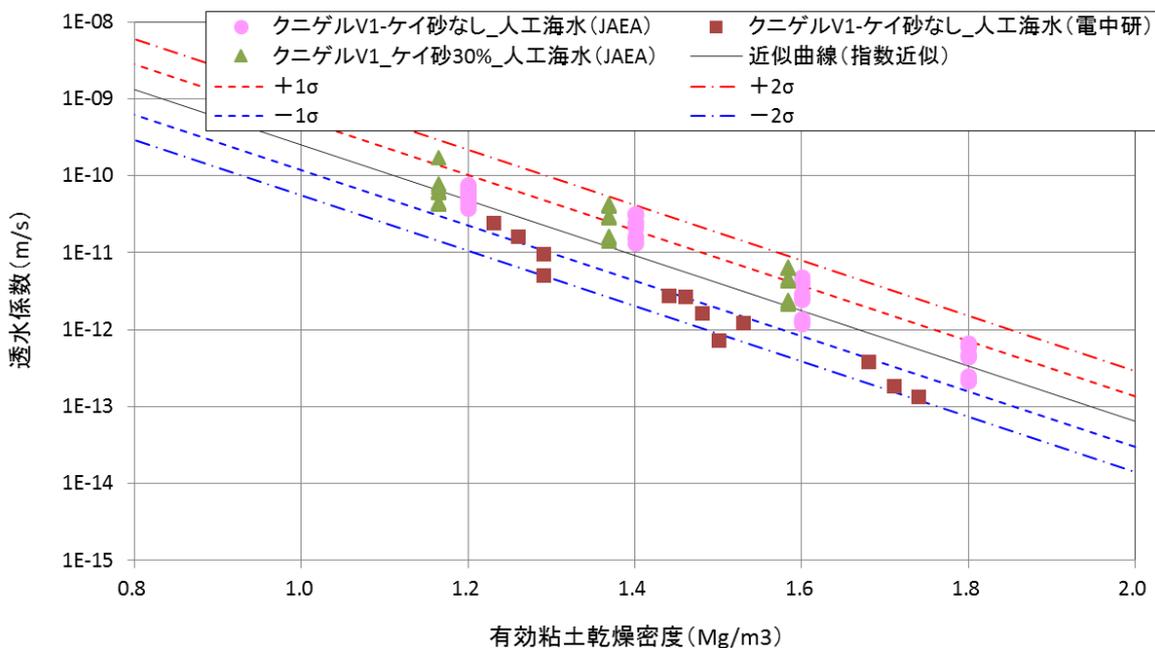


図 6.2.2-2 有効粘土密度と透水係数の関係 (クニゲル V1、人工海水)

なお、透水係数は材料や間隙水の違いのほか、温度の影響も受けると考えられる。ここでは JAEA 緩衝材データベースに整理されている試験温度ごとのデータ (室温、25℃、40℃、60℃、80℃、90℃) を基に、温度条件を「室温および 25℃」、「40℃および 60℃」、「80℃および 90℃」に分類して図 6.2.2-3 に示す。図より、温度が高ければ透水係数は大きくなる傾向が明らかである。本検討では、JAEA 緩衝材データベースのクニゲル V1 以外のデータは試

験の温度条件が明確でないものが多いためデータを統一的に扱ったが、本来は試験温度で分けるべきである。

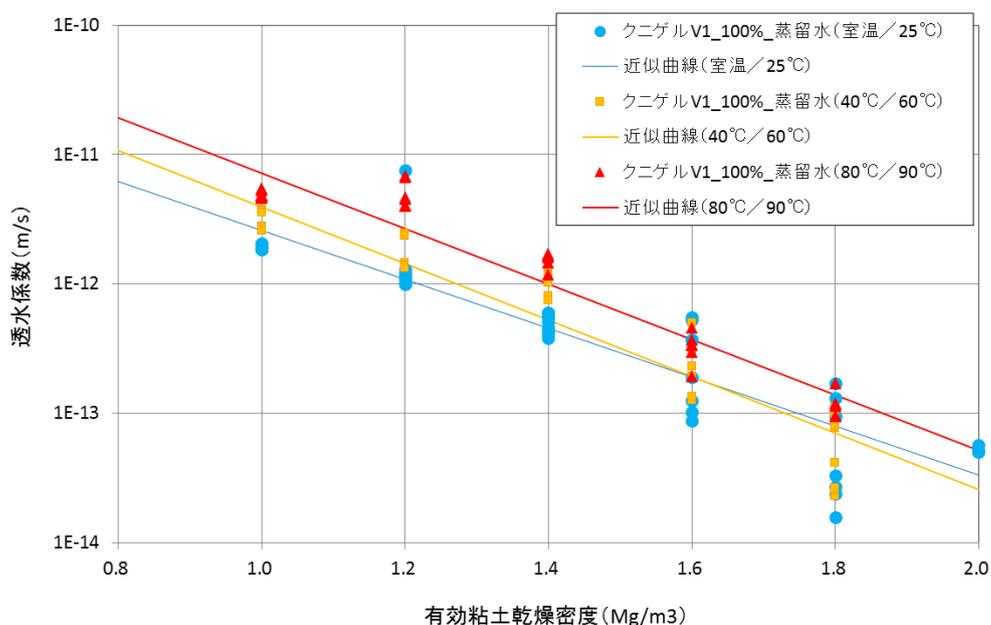


図 6.2.2-3 透水係数に対する試験温度の影響 (クニゲル V1、蒸留水)

(2) データのばらつきの取扱い

透水係数は、同じベントナイト材料であっても試験の供試体ごとにモンモリロナイト含有量等が異なること等によりデータにばらつきの生じることが考えられる。ここでは、(1)同様クニゲル V1 のデータについて、有効モンモリロナイト密度を横軸にとり、モンモリロナイト含有率をパラメータとして透水係数を再整理した (図 6.2.2-4 および図 6.2.2-5)。各図では、クニゲル V1 のモンモリロナイト含有率 $C_m=50\%$ を基本とし、これの $\pm 10\%$ のばらつき ($C_m=40\%$ および 60% の場合) を想定した。また、 $C_m=50\%$ のデータに対するばらつきの範囲として、 $\pm 2\sigma$ の近似曲線もあわせて示した。なお、有効モンモリロナイト密度の算定にあたり、ベントナイト内におけるモンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度を 2.81Mg/m^3 とした。

各図より、クニゲル V1 のモンモリロナイト含有率のばらつきを $50\% \pm 10\%$ の範囲で考慮したところ、そのばらつきはモンモリロナイト含有率 50% の近似曲線 (平均値) $\pm 2\sigma$ の範囲内に概ね収まっているといえる。このことから、透水性のばらつきの範囲として 2σ 程度を見込めば、モンモリロナイト含有率の不確実性は概ね考慮しているとみなして良いと考えられる。

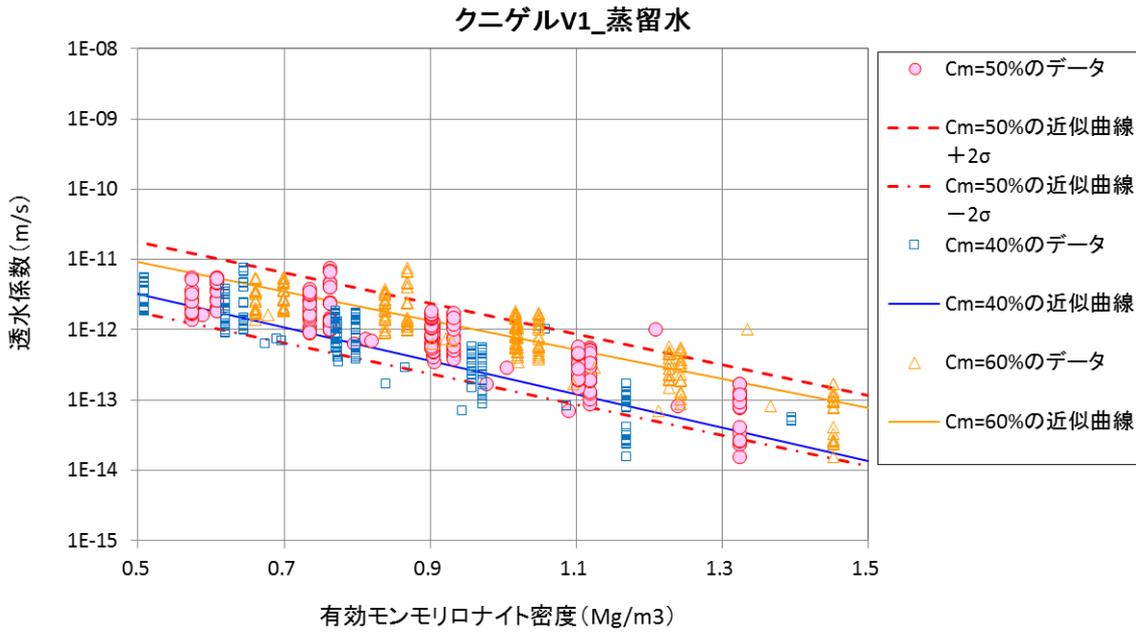


図 6.2.2-4 モンモリロナイト含有率 C_m と透水係数の関係 (100%クニゲル V1、蒸留水)

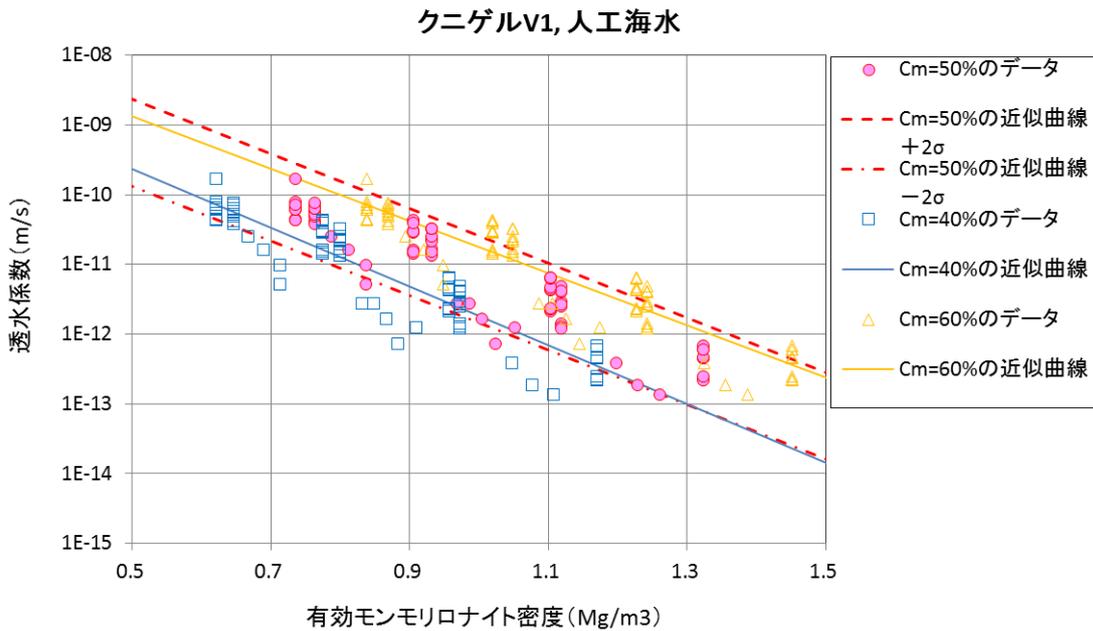


図 6.2.2-5 モンモリロナイト含有率 C_m と透水係数の関係 (100%クニゲル V1、人工海水)

上記の知見をふまえ、透水性のばらつきの範囲として $+2\sigma$ を考慮した場合の緩衝材の仕様の範囲を図 6.2.2-7 に例示する。図 6.2.2-7 の各図では、各設計要件に対応する曲線は 7.2 において例示したものと基本的に同じであり「低透水性」に関わる条件のみを変更している。その条件としては、図 6.2.2-6 に示す通り、平均値 $+2\sigma$ を考慮した透水係数を満足するための緩衝材の膨潤後の有効粘土密度として 1.29Mg/m^3 以下となるよう設定した。

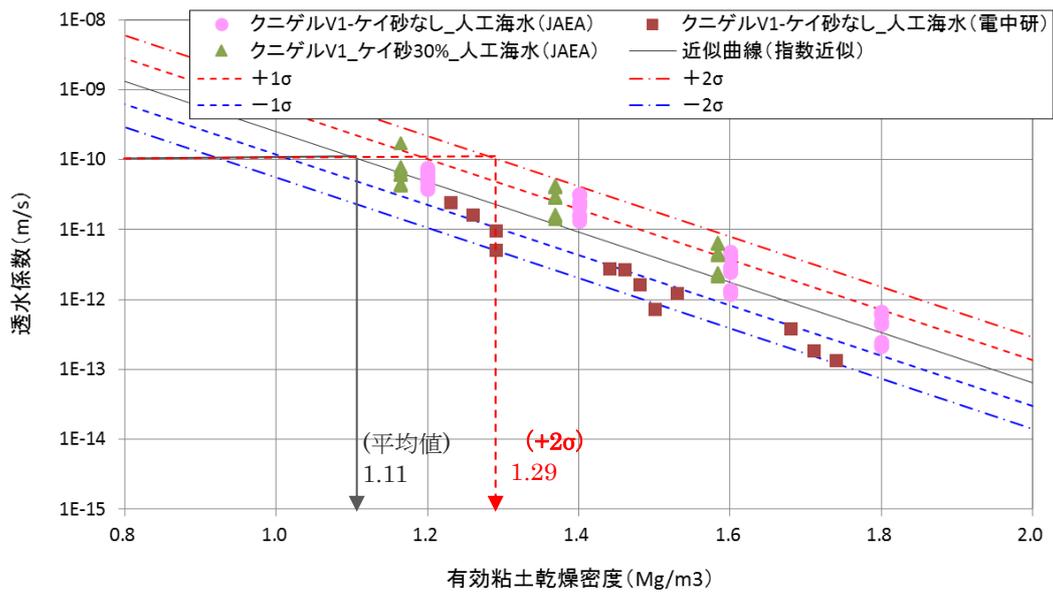
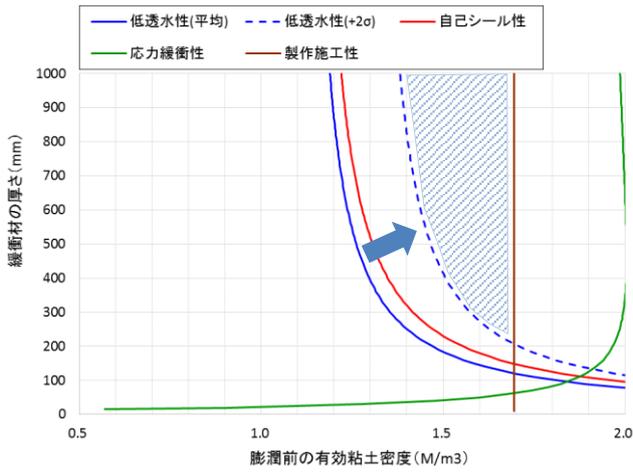
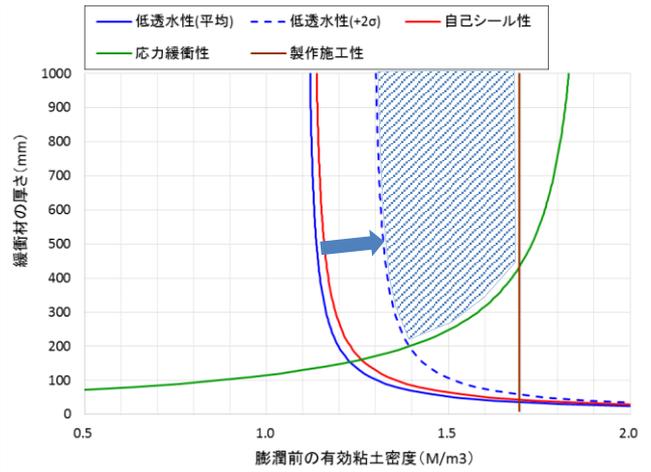


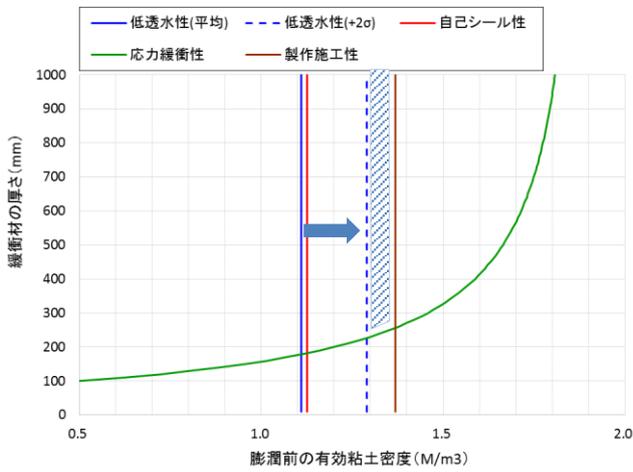
図 6.2.2-6 有効粘土密度と透水係数の関係 (クニゲル V1、人工海水) (再掲)



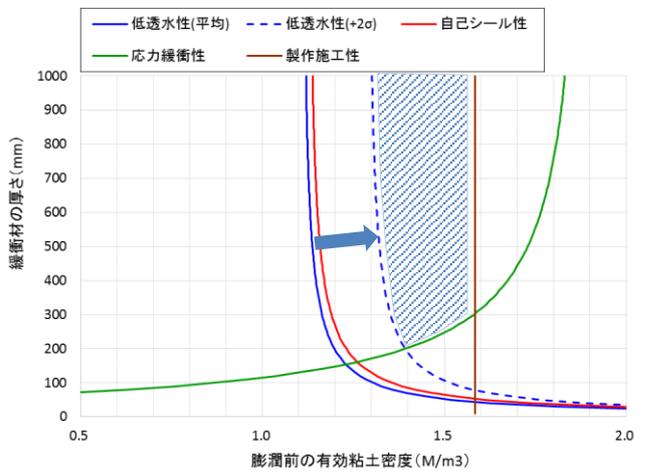
処分孔縦置き・ブロック式



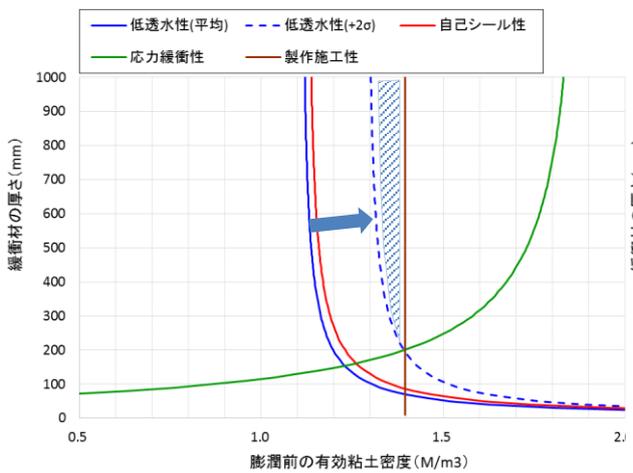
処分孔縦置き・ブロック+ペレット



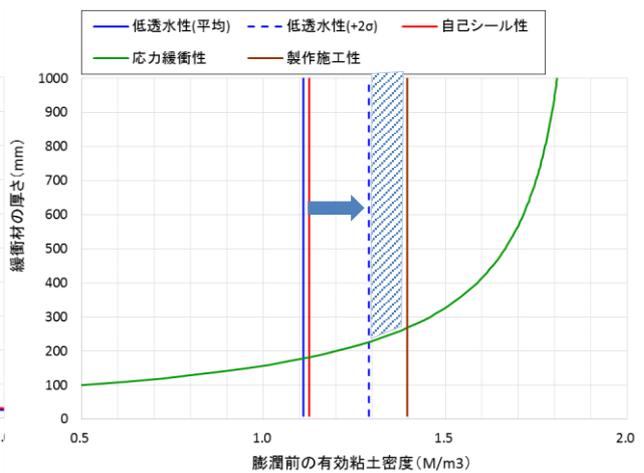
処分孔縦置き・吹付け (無人施工)



横置き PEM・撒き出し締め



横置き PEM・吹付け (有人施工)



横置き PEM・吹付け (無人施工)

図 6.2.2-7 各設計要件に対する緩衝材の仕様範囲の例示 (透水性のばらつき考慮)

6.3 課題の整理とまとめ

6.1 および 6.2 において実施した検討結果から今後の課題を抽出し、以下に提示する。

● 設計方法に関する課題

6.1.1 では、設計におけるエロージョンへの対応として、許容湧水量を設定し、これに対応する緩衝材の流出量から施工時の緩衝材密度を設定する方法を提示した。しかし、各人工バリアへの湧水量は、隣接する処分坑道の配置やその掘削順序、廃棄体および緩衝材の定置手順、埋戻しまでの手順、坑道開放期間等によって異なるものとなる。すなわち、緩衝材の設計ではため、施工手順や回収可能性を維持する期間（坑道の開放期間）、施工時の実際の条件を考慮した現実的な湧水量等を考慮反映する必要がある。ただし、このような状況がより具体的になるのは処分坑道の建設時以降であるため、そうした条件を反映する形で事前に廃棄体 1 体ごとの緩衝材の設計を行うことはできない。実際には、施工前の設計における緩衝材の形状寸法については処分場全体（あるいはパネル等の単位ごと）に一様なものとして決定しておき、施工時の条件・状況（湧水量、施工手順など等）に対応する形で、必要に応じて緩衝材の密度を元設計から割増しするか、工学的対策により湧水量を低減するか、あるいは定置場所として棄却するか等を判断するのが現実的と考えられる。この場合、サイトの地下水環境を考慮しつつ施工手順も含めてどのような設計が合理的となるかについては検討が必要である。このような課題をふまえ、本検討では、緩衝材の設計フローを包含しつつ、「定置時の課題となる湧水対策（ex. 許容湧水量）」及び「定置後（閉鎖まで）の課題となる湧水によるエロージョン対策（ex. 許容エロージョン量）」の観点を加味した緩衝材の設計・施工の全体フローに関わるより大きな考え方の一案を提示した。

本検討では施工時のすき間については、施工方法に応じたすき間の大きさを設定仮定し、これに応じた緩衝材の密度を設計決定する方法を提示した。ただし設計においては施工誤差を考慮する必要がある、施工方法ごとにどの程度のすき間を設定すべきかについては、また、処分孔の掘削や緩衝材定置時の施工誤差も含め、施工技術とも関連して今後に関するより具体的な検討が今後必要である。また、といえる。また、「製作施工性」は緩衝材の仕様を決める上で重要な要件であり、クニゲル V1 以外の材料の使用可能性も含め、今後の検討の進捗に応じて施工試験データを拡充していく必要がある。設計に用いるデータのばらつきについては、本検討では透水係数に対する検討を実施したが、膨潤量など他のデータについてもばらつきと安全裕度のとり方について検討知見を整備する必要がある

● 設計に必要なデータに関する課題

6.1.2 では、緩衝材の設計方法として、各設計要件において、海外産ベントナイトを満足含めた複数の材料を統一的な指標で取り扱える可能性について検討するため、低透水性に着目して透水係数データを整理・分析した。その結果、緩衝材の仕様範囲を規定する厚さと～密度の関係（ $L \sim \rho$ 図）を図示し、これを利用して仕様範囲の設定することとした。この図において、密度として現状は膨潤前の有効粘土密度を用いることとしており、緩衝材の材料関係図は、材料ごとに作成するのが適当すべきであると考えられる。よっての判断が得られた。したがって、海外産

を含めた候補材料のそれぞれに対して各設計要件に対応したデータを整備する必要がある。その意味では、ベントナイトの種類を選択肢を広げるため、海外産ベントナイト材料の「コロイドろ過性」「施工性」「自己シール性」に関わるデータを整理する必要がある。「微生物影響の防止」については、SKB の試験データからに基づき、微生物の影響を抑制するための閾値として間隙比を想定した場合、0.43 程度との知見が得られており、であった。これを我が国で検討されている仕様例（30%ケイ砂混合、乾燥密度 1.6Mg/m³ のクニゲル V1 で 0.68）に照らすと非常に厳しい制約条件になるため、このような知見を緩衝材の設計にどう取り入れるかは今後の課題といえる。

● まとめ

6.1 においては、まず緩衝材の設計要件の関連性を整理し、緩衝材の設計要件の関連性や従属関係等を整理した。これにより、緩衝材に求められる機能を満足するための上位の要件として「低透水性」「コロイドろ過性」「製作施工性」、従属的な要件として「自己修復性」「自己シール性」「物理的緩衝性」「微生物影響の防止」を位置付けた。次いで、設計における留意事項として「施工時のすき間に起因した再冠水後の残留密度差が生じる可能性」および「再冠水過程におけるパイピング・エロージョンの発生条件と発生量」をとり挙げ、設計における取扱い方法について検討した。前者については、既往の研究成果に基づき施工時の隙間に起因する再冠水後の残留密度差を試算・例示した。また、その密度差が水理場へ与える影響について、「低透水性」の指標としたペクレ数の観点で検討し、ペクレ数の算定で用いる地下水流速は、均質膨潤を仮定した平均流速で問題ない見通しを得た。後者については、湧水によるエロージョンへの対応として、許容湧水量を設定した上で、流出分を見込んだ緩衝材密度の設定方法を提示した。

続いて、各設計要件に対して緩衝材の満足すべき仕様範囲の設定方法を示し、仮定した条件に基づく試算結果（「施工時の密度」～「緩衝材厚さ」の関係図）を例示した。その際、「自己シール性」については従来の設計の考え方に代わる新しい設計指標を導入した。また、これらの検討をふまえて、緩衝材の実質的な設計要件は「低透水性」「製作施工性」「自己シール性」「物理的緩衝性」に絞り込まれることを示した。以上をふまえ、緩衝材の設計フローを作成するとともに、工学的対策や施工手順との関連性を含めた、より大きな設計の考え方の概要を示した。さらに、ベントナイト材料に関わらない統一的な指標として、「有効モンモリロナイト密度」の適用性について「低透水性（透水係数）」の観点でデータの収集・整理・評価を行った結果、適用は困難で、使用する材料ごとにデータ取得・評価の方が現実的との結論に至った。

6.2 においては、緩衝材の設計に必要なデータについて、クニゲル V1 以外の公開データも含めて対象として整理し、そのばらつきの取扱い方法について言及した。具体的には、透水係数データのばらつきの範囲について検討し、設計において平均値+2 σ （ σ ：標準偏差）の範囲を考慮した場合の仕様の範囲を例示した。また、設計に必要なデータとして海外産ベントナイト材料の「コロイドろ過性」「施工性」「自己シール性」に関わるデータを整理する必要性、および「微生物影響の防止」に関する設計方法の課題について言及した。

以上のように、本検討では緩衝材の設計施工に関わる現状の知見を整理し、設計方法に関する提案を行った。ただし、緩衝材の設計においては施工誤差等も考慮する必要があり、考慮すべき

湧水についてはサイト条件や施工手順、工学的対策とも関連するため、今後も総合的な観点からの検討が必要である。

第6章 参考文献

- [1] 窪田茂：NUMO セーフティケースに関する外部専門家ワークショップー (3) 処分場の設計と工学技術、2016年9月
- [2] 原子力発電環境整備機構：NUMO-TR-11-01 地層処分事業の安全確保 (2010年度版) 第6章「処分場の設計, 建設・操業・閉鎖技術」
- [3] 原子力発電環境整備機構：NUMO-TR-10-09 地層処分事業のための安全評価技術の開発 (I) -シナリオ構築技術の高度化-, 2011年3月
- [4] 小林ほか：再冠水過程が緩衝材の品質に与える影響に関する研究 (その2) ベントナイトの膨潤挙動に関する一考察、土木学会第65回年次学術講演会、CS7-014、平成22年9月
- [5] 小林ほか：緩衝材の再冠水挙動評価 (8) パイピング・エロージョン現象の実験的検討、日本原子力学会2014年秋の大会、2014年9月
- [6] 電気事業連合会・核燃サイクル開発機構：TRU 廃棄物処分技術検討書ー第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめー、2005年9月
- [7] 笹倉ほか：ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得 II, JNC-TJ8400 2003-048 (2003)
- [8] 竹内ほか：緩衝材の再冠水挙動評価 (7) 緩衝材ブロック、ペレットにおけるパイピング・エロージョンの発生条件とエロージョン量の評価、日本原子力学会2013年秋の大会、2013年9月
- [9] Svensk Kärnbränslehantering: Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site, TR-10-47, November 2010
- [10] 原環センター：平成24年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術「人工バリア長期性能評価技術開発」報告書 (第1分冊) ー人工バリアの長期挙動の評価ー
- [11] 核燃サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-, 1999年11月
- [12] 笹倉剛, 畔柳幹雄, 岡本道孝 (2002) : ベントナイト変遷挙動のモデル化のデータ取得及び調査, JNC TJ8400 2002-025.
- [13] 黒澤進, 久野義夫, 諸岡幸一, 上田真三 (2003) : 圧縮成型ベントナイト中のコロイドの移行試験 -3wt%NaCl 溶液及び Ca 型ベントナイトを用いた検討-, JNC TN8430 2003-006.
- [14] 田中幸久, 中村邦彦 (2005) : 海水の濃度と高温履歴がベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.806/III-73, pp.93-111.
- [15] 小林ほか：Kozeny-Carman 則を用いたベントナイト系人工バリアの止水性能評価、土木学会第70回年次学術講演会、CS12-025、平成27年9月
- [16] Kurosawa, S., Tanaka, S., James, S. C. and Yui, M. (2006) : The Effect of Montmorillonite Partial Density of the Role of Colloid Filtration by a Bentonite Buffer, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 43, No. 5, pp. 605-609.

- [17] 穂刈利之, 沖原光信, 石井卓, 小島圭二 (1996) : ベントナイト混合土の自己修復性に関する考察, 27 放射性廃棄物研究, Vol.3, No.1, pp.15-23.
- [18] 田中幸久, 廣永道彦, 工藤康二 (2009b) : 飽和した高密度ベントナイトのガス移行メカニズムとそのモデル化, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.1, pp.303-320.
- [19] 小林一三, 戸井田克, 笹倉剛, 太田秀樹 (2007) : 等含水比線と等飽和度線を用いた締めベントナイトの圧縮・膨潤挙動の解釈, 土木学会論文集 C, No.63, No.4, pp.1065-1078.
- [20] 原環センター : 平成 15 年度 地層処分技術高度化調査等 遠隔操作技術高度化調査報告書 (2/2)、2004 年 3 月
- [21] 原環センター : 平成 23 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書 (第 1 分冊) —遠隔操作技術高度化開発— (2/2)、2012 年 3 月
- [22] 緩衝材の再冠水挙動評価 (2) ベントナイト系人工バリア長期性能の不確実性軽減のための施工技術の高度化、日本原子力学会 2011 年秋の大会、B32、2011 年 9 月
- [23] 谷口ほか (2001) : ベントナイト中における硫酸塩還元菌の活性と硫化水素によるオーバーパック材料の腐食への影響、JNC TN8400 2001-011
- [24] 鈴木ほか (2014) : 緩衝材の再冠水挙動評価 (9) 処分概念におけるパイピング・エロージョンの考え方、日本原子力学会 2014 年秋の大会、2014 年 9 月
- [25] 地盤工学会ほか (2016) : 低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する研究委員会研究報告書、2016 年 12 月
- [26] 寺田ほか (2011) : 中国産ベントナイトの利用可能性調査報告書、原環センター技術報告書、RWMC-TRJ-10002、平成 23 年
- [27] (財) 電力中央研究所 : ベントナイトの透水・浸潤特性への海水影響、研究報告 N04005、2004 年 10 月
- [28] Daniel Svensson et al.: Alternative buffer material - Status of the ongoing laboratory investigation of reference materials and test package 1, SKB-TR-11-06, July 2011.
- [29] Ola Karnland et al.: Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials, SKB-TR-06-30, December 2006.
- [30] Andreas Bengtsson, et al.: Microbial sulphide-producing activity in water saturated MX-80, Asha and Calcigel bentonite at wet densities from 1500 to 2000 kg m⁻³, SKB TR-16-09, February 2017.

< 付録 >

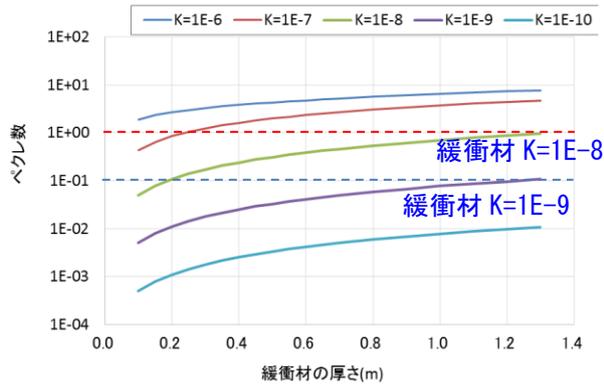
参考として、母岩の透水係数と動水勾配を変更させてペクレ数を算定した結果を以下に示す。ここでは母岩の透水係数として $K=2E-10$ m/s (第2次とりまとめにおけるレファレンスケースの母岩透水係数の平均値)、 $2E-9$ m/s、 $2E-8$ m/s の3通り、動水勾配として $i=0.01$ 、 0.05 の2通りの計6ケースについて考え、各ケースにおいて緩衝材の透水係数を $1E-6$ m/s、 $1E-7$ m/s、 $1E-8$ m/s、 $1E-9$ m/s、 $1E-10$ m/s の場合についてペクレ数を算定した。その結果を図-参考-1に示す。なお、EDZの幅は0.5m、EDZの透水係数は母岩の10倍、実効拡散係数は $1E-10$ [m²/s]で共通の条件とした。

各図においては緩衝材の厚さとペクレ数の関係を示している。破線は、ペクレ数 Pe の基準の例として $Pe=1$ (赤) および $Pe=0.1$ (青) 示しており、緩衝材厚さに関わらずこれを下回るために必要な緩衝材透水係数の上限値を例示した。その結果を表-参考-1に整理した。この結果はあくまで試算例であり、サイト条件によってペクレ数は大きく変わるものであることに留意が必要である。

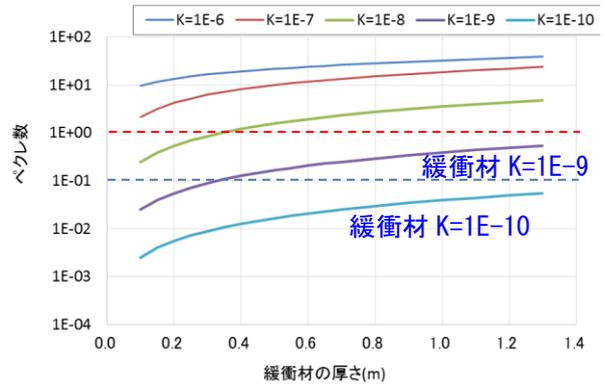
表-参考-1 条件を満足するために必要な緩衝材透水係数の上限値 (単位[m/s])

条件	母岩 $K=2E-10$ m/s		母岩 $K=2E-9$ m/s		母岩 $K=2E-8$ m/s	
	$i=0.01$	$i=0.05$	$i=0.01$	$i=0.05$	$i=0.01$	$i=0.05$
$Pe < 0.1$	$1E-6^{**}$	$1E-10$	$1E-9$	$1E-10$	$1E-9$	$1E-10$
$Pe < 1$	$1E-6^{**}$	$1E-6^{**}$	$1E-6^{**}$	$1E-9$	$1E-8$	$1E-9$

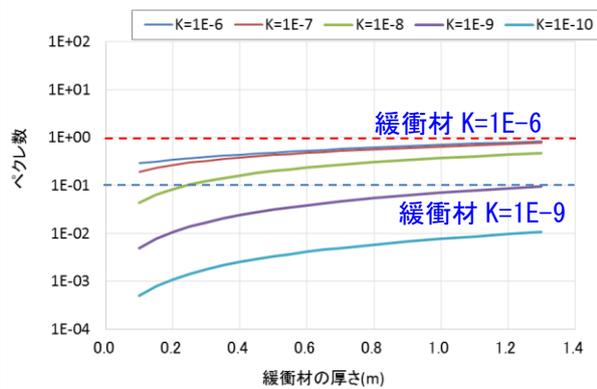
※仮に緩衝材の透水係数の上限値を $1E-6$ m/s とした場合



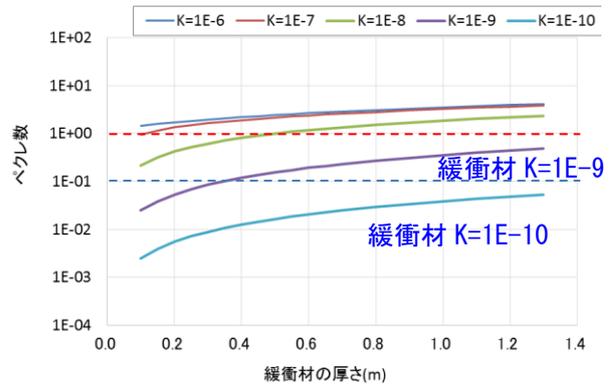
(動水勾配=0.01、母岩透水係数=2E-8 m/s)



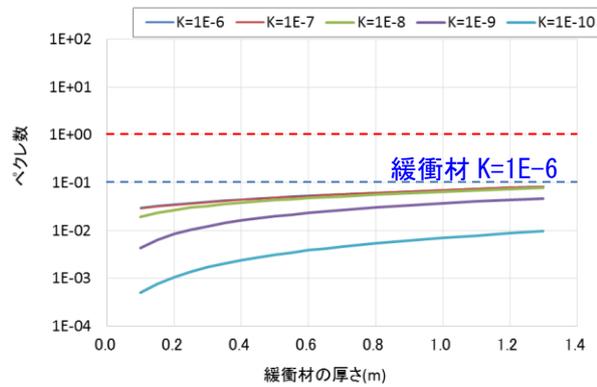
(動水勾配=0.05、母岩透水係数=2E-8 m/s)



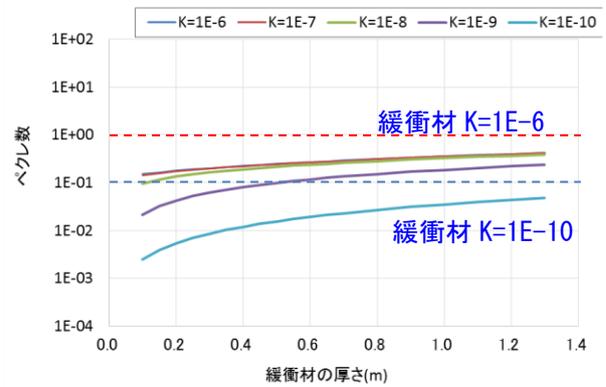
(動水勾配=0.01、母岩透水係数=2E-9 m/s)



(動水勾配=0.05、母岩透水係数=2E-9 m/s)



(動水勾配=0.01、母岩透水係数=2E-10 m/s)



(動水勾配=0.05、母岩透水係数=2E-10 m/s)

図-参考-1 緩衝材の透水係数ごとの「緩衝材厚さ～ペクレ数」の関係

第7章 まとめ

今年度は5年間計画の本事業の最終年度であるため、長期に行ってきた試験を終了とし、可能なものに関しては試験終了後に供試体を解体して分析を行った。得られた結果から、本年度の成果についてまとめたものを以下に示す。また、本検討は、再冠水後の緩衝材の状態を解析的な手法によって予測するという最終的な目的に向けて、室内試験に基づく解析的な評価手法の検討についても着手している。この検討についても現状の到達点と残された課題をまとめる。5年間全体のまとめについては、別途、「5年間の取りまとめ」報告書を参照されたい。

7.1 緩衝材の地下水浸潤に係る調査

再冠水による緩衝材の状態変化は、地下水の浸潤に起因して生じる。ここでは、浸潤に係る事象として、まず、浸潤の速度をモデル試験として取得することを考えた。蒸留水と NaCl 水溶液の2種の液種を水位差によって浸潤させる試験を行った。また、膨潤した後に不均一な緩衝材が膨潤力によって均一化する挙動について、応力のつり合うところまでの変形が起こることを予測し、直接接触しない試験装置を用いて応力を作用させ、変形と密度の変化を測定する試験を行った。これらの試験は、力学の理論的解釈を確認する試験としての位置付けとともに、解析の検証試験となることを目標としている。昨年度から、これらの試験をモデル化し、解析的な評価手法の検討も開始した。

7.1.1 緩衝材への地下水浸潤状況の評価

本検討によって、ベントナイト系緩衝材への浸潤速度を取得した。速度の測定のために一次元と見なせる試験系を考え、密度が均一と見なせるように、50mmφ、1000mmのアクリルの筒中に5mm ずつベントナイトを圧密して、供試体を作製した。水の供給は一定圧力になるように制御した。浸潤による飽和度は、予め飽和度と比抵抗値の関係を取得して、比抵抗値の測定によって求めた。

浸潤速度を得ることは再冠水過程を予測するための時間軸の設定となる。この浸潤速度が把握できれば、解析手法に本試験結果を反映させることによって緩衝材内の飽和の過程を取り扱うことができ、それによって、膨潤力の発生進展状況等にも繋げていくことができると考えられる。また、化学的な変質挙動が施設閉鎖後の何時から始まるのか等も推定できる。

本試験で得られた浸潤速度は、一次元で不飽和状態の緩衝材に蒸留水や NaCl 水溶液を浸潤させた場合、浸潤フロントの進展速度を実験的に取得したものである。浸潤速度式は、拡散方程式の解が時間の平方根に比例することに概ね整合する結果であり、この試験結果は、従来の不飽和状態の緩衝材の水の浸潤に対して、イオン濃度の異なる場の水自身の拡散運動として捉えるやり方の妥当性の裏付けになるものである。

昨年度、本試験をモデルとして解析コード、DAC SAR[1]と COMSOL[2]を使って不飽和一次元

浸潤解析で再現解析を行った。この結果、試験結果を再現するための情報が得られ、一次元のベンチマーク試験として活用することができた[3]。COMSOLについては、連成解析のプラットフォームとすることのできる解析ツールであるため、今後、DACSARを取り込んだ解析ができる可能性もあり、再冠水期間の挙動予測のために有効なツールと考える。

同一の試験系による膨潤変形試験は、緩衝材が隙間を膨潤によって埋める際の進展についての挙動把握を行った。緩衝材の位置毎の膨潤挙動を得るためにマーキングし、体積拘束せずに膨潤させた場合の挙動を、5mmの層毎に定量的に把握することを目的とした。

本試験によって、体積を拘束させない場合には、まず、圧縮された緩衝材のごく表面付近が膨潤し、膨潤することにより内部への浸潤が遅くなることがわかった。この挙動により、膨潤する緩衝材の表面に密度が低い部分が生じることを意味する。隙間が埋まってからは内部からの膨潤により変形し、浸潤部分の密度は高まるとされている（[4]など）が、湧水環境であれば、隙間が埋まる過程の緩衝材密度の低い部分でベントナイトが流出することがこれまでの試験で示されている[5]。そのため、膨潤の進展を把握することは緩衝材流出発生境界値の検討と合わせて考えることにより、再冠水時の初期に起こる緩衝材の流出の挙動把握を深めることにつながると共に、緩衝材の流出抑制の対策を考える上でも有益なデータとなる。また、現在の緩衝材の施工方法は、緩衝材と周囲の岩盤との間は隙間のまま、若しくはペレットを充填する方法か、原位置締固めや吹付けのように界面に隙間なく施工出来る方法等が想定されており、施工方法の選択において界面の水理場の把握が重要である。

7.1.2 施工特性（密度差）が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響

(1) 残留密度差の理論的解釈

ベントナイト系材料は、再冠水によって膨潤するため、緩衝材の施工時の密度分布や隙間などがあっても、飽和後には均質化すると考えられている。そのため、過去に密度分布を有する供試体が均質化する様子を取得する試験は数多くなされてきた。しかしながら、これらの試験で密度分布がなくなるまで均質に膨潤した例は無い。いずれの結果も、初期に均質化する傾向が見られるものの、最終的には密度差を残したままで膨潤変形が収束している。

ベントナイト系材料が均質化するというを説明するために、熱力学や鉱物化学的なアプローチでは変形という概念を導入することが難しい。基底間隔を積み重ねた物が膨潤量としても、境界条件を導入できないためである。このため、これまでの評価では、不均質な湿潤環境における力学的な検討が不十分であったため、乾燥密度と膨潤圧、膨潤量は一意の関係にあると考えられてきた。密度の異なるベントナイト系材料を接触させた膨潤による均質化試験は先行圧密圧力（降伏点）と初期応力状態の異なる材料のサクションを開放させた場合の変形試験と考えられる。この時考慮すべき応力はこれだけではなく、浸透膨潤に伴う膨潤応力も考慮しなければならない。この浸透膨潤応力は、熱力学的には単位体積当たりのモンモリロナイトと水のモル数によって決まる。力学的には、物体の変形は、浸透膨潤応力を含む力が釣合う点で止まると考えられる。しかしながら、従来の解釈は、浸透膨潤応力のみを考えていたため、乾燥密度が同じ（単位

体積当たりのモンモリロナイトと水のモル数が同じ)であれば同じ密度になるまで膨潤変形すると考えられてきた。このような力学的な観点から、従来行われてきたベントナイト系材料の均質化試験を考えると、残留密度差は応力のつり合いで解釈できることが明らかとなった。

(2) 解析技術への反映

本検討で実施した小規模試験を弾塑性力学に立脚した土水連成解析によって別途解析した。その解析では、緩衝材の膨潤挙動は、サクシオン圧の開放と比表面積の増加で表現した。このような土構造骨格の力学とその間隙を満たす水の水理を連成させた解析によって、ベントナイトの膨潤挙動に関して知見が得られた。

本検討では、このバネの反力がサクシオンの開放によって生じるというモデル化によってベントナイトの膨潤挙動がある程度表現できると考えている。また、このサクシオンは水分特性曲線によって飽和度の関数として与えられている。本解析で用いた水分特性曲線では、サクシオンは飽和度が1(100%)になればゼロになるという、非膨潤性鉱物のモデルを用いているために、平衡膨潤圧がゼロとなり、ベントナイトの実験事実を表現できない。言い換えれば、ベントナイトのような膨潤性鉱物の水分特性曲線を取得できれば力学と水理解析でも膨潤圧を取得できることになる。

また、本検討によってベントナイト系材料であっても、一般の地盤材料と同様に、応力履歴の影響を受け、その影響で均質化しない可能性があることを指摘できた。このことは、試験実施前から予想していた通りであるとは言え、これまでは力学試験結果と膨潤による均質化試験から得られる残留密度差が整合しているという実験事実から外挿していたものであり、この推論の確証を得るためには、再現性の確認や様々な初期条件からの膨潤圧、膨潤量試験が必要である。これに対し、今回実施した膨潤圧、膨潤量試験は力学的解釈のために要素となる現象の検証試験として実施された。今後は、応力ひずみ関係に相当する間隙比(乾燥密度)と圧密圧力の関係や水分特性曲線の取得が必要である。これらの取得により、ベントナイトの膨潤モデルの構築や解析コードの高度化などが可能になると考えられ、7.4.2では、広範囲の乾燥密度に対応できる構成式の高度化に取り組んでいる。

7.2 再冠水時の緩衝材の変質に係る検討

7.2.1 Ca型化が緩衝材に及ぼす影響の検討

平成21年度から平成26年度まで実施していたケースでは、現象把握を重視したために、通水液を2回変更したり、ケースによって通水圧を上げたりしたため、その解釈が困難となったことから、現象の解釈のために試験条件をシンプルにした試験ケースを平成27年度より開始した。平成26年度まで実施していた試験と同様に、ベントナイトを蒸留水で飽和させてからCaCl₂水溶液を通水するケース(Case1R)において、液種交換後に膨潤圧が減少傾向を示した。また、供給量から算出したCase1Rのイオン交換サイトのNaイオン当量に対する供給したCaイオン当量の割合は69%、Case2Rは202%であったのに対して、排水中のNaイオンがCaイオンを交換し

たものと仮定して算出した Case1R の Ca 型化率は 7%、Case2R は 63%であった。排水中の Na イオンから算出した Ca 型化率は、排水中の Na イオンがすべて Ca 型化によって層間から陽イオン交換反応によって発生したという仮定から算出しているため過剰な評価ではあるにも関わらず、供給した Ca イオンの量に対して非常に低いことから、Ca 型化が供給されたイオンが全て作用して瞬時に発生するという取り扱いはできないことが明らかであった。特に、先に蒸留水で飽和させてから CaCl₂ 水溶液を通水した場合は、イオン交換が抑制されると考えられ、この事実は平成 26 年度までに行った試験の結果と整合している。

平成 26 年度まで実施していた試験結果も踏まえると、飽和と Ca 型化に対して透水係数は可逆的であるが、膨潤圧は非可逆的という可能性がある。このことは、膨潤圧の大きさが緩衝材に期待する性能の一つである場合、Ca 型化と飽和の発生する順番で膨潤圧が異なる可能性があるということの意味している。今回の試験においても、Ca 型化が進むことにより膨潤圧の上昇が抑えられる可能性が示唆されていることから、この緩衝材の機能の低下に対して対策が必要となる。再冠水期間に Ca 型化が起り得るシナリオを考慮した上で、施工および対策を行う必要がある。

7.2.2 鉄による変質挙動の把握

本事業の中で、緩衝材が鉄系の材料と接触する試験が複数行われた。緩衝材については施工方法の高度化開発として行った吹き付け試験のために鋼製の枠を使い、枠に設置した通水孔から水を注入した。この試験では水が排出されるような状態にして測定した破過圧が減少し、解体によってベントナイトが変色していることがわかった。破過圧の減少は、緩衝材の機能劣化につながる挙動と考えられるため、緩衝材の変質に関する分析を行った。また、オーバーパックの腐食試験は 10 年にわたり行われ、地下環境でも 2 年間の腐食試験が行われた。これまでは、腐食試験の際にオーバーパックの周囲に設置されたベントナイトの変質には目を向けられなかったが、本検討では、得られた鉄接触ベントナイトは貴重な試料であるため、これについても分析を行い、鉄の腐食と緩衝材の変質の相互作用について考察した。

吹き付け施工後のベントナイトは、室温で 1 年、酸化雰囲気での試験である。しかし、温度が低く、短期間であっても、鋼製枠から供給された水酸化鉄 (Fe(OH)₂、FeOOH 等) がベントナイトの空隙に見られ、また、ノントロナイトの生成も見られた。この試験の通水液は海水ではないが、酸化雰囲気であることなどが影響しているものと思われた。

腐食試験は、80℃、還元環境下で行われた。浸漬液は海水と淡水の 2 種が使われ、5 年目と 10 年目に解体分析を行った。溶液系が違うことにより、変質に違いがあることがわかった。各溶液系におけるこれらの材料の変質相について表 7.2.2-1 にまとめたものを示す。

表 7.2.2-1 溶液系における変質相の違い

溶液系	炭素鋼の変質相	ベントナイトの変質相
海水	$\text{Fe}(\text{OH})_2$ Fe-silicate (Na, S, Cl 含む) Fe_3O_4 (酸化的などとき) FeCO_3 MnS SiO_2	Fe 蛇紋石 Fe サポナイト ノントロナイト(酸化的などとき) サニディン 石膏
淡水	$\text{Fe}(\text{OH})_2$ Fe-silicate (Na, S 含む) Fe_3O_4 (酸化的などとき) SiO_2	Fe 蛇紋石 Fe サポナイト サニディン

7.3 緩衝材の流出に関する検討

7.3.1 緩衝材の流出に関する室内試験

本検討では、緩衝材のパイピングやエロージョンに関する現象およびその工学的対策に関する知見を得ることを目的として、室内試験による検討を行った。以下に本年度行った試験についてのまとめを示す。

①流出現象に対するケイ砂の影響

緩衝材の流出現象に対するケイ砂（緩衝材含有のもの）の影響を確認するため、ケイ砂含有率の異なる緩衝材ブロックを用いた流出試験を行った。その結果、ケイ砂含有率が高いほど有効ベントナイト乾燥密度が低いために膨潤性能が小さく、水みちの断面積が大きくなる傾向等、パイピングの形成に違いが確認されたものの、総通水量とエロージョン質量の関係はすべてのケイ砂含有率で有意な差はなく、ケイ砂含有率が緩衝材の流出現象に与える影響は小さいことがわかった。

②高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験

実際の処分場で想定される高水圧・低流量下における緩衝材の流出現象を評価するために、圧力制御による通水、および側面の多孔質体からの緩衝材への水が作用する環境で、流出試験を行った。その結果、緩衝材の膨潤により、通水量が減少する傾向（90mL/min から 50mL/min（20 日程度））が確認された。その条件下においても緩衝材の流出現象は確認され、その総通水量とエロージョン質量の関係は、通水量が時間経過に伴って減少していることから、勾配が緩くなったものの、平成 28 年度までに実施した工学規模での流出試験の結果[3]と概ね同じ傾向でデータが推移した。

③亀裂を有する模擬岩盤への流出試験

孔壁近傍の亀裂（EDZ 等）からの流出挙動を把握する目的で、亀裂を有する岩盤での処分孔

を模擬した流出試験を行った。亀裂の隙間は 1mm とした。その結果、1mm の隙間からもこれまでの試験と同様の流出現象が確認された。また、通水液として用いた液種（イオン交換水、NaCl 水溶液）の影響が大きく、NaCl 水溶液を用いた場合の総通水量とエロージョン量の関係は他のケースと比べて下限値を示すことが確認された。これは NaCl 水溶液によりベントナイトが凝集し、流路を閉塞する等が原因であると思われる。

今年度は、隙間に堆積するケイ砂の影響、高水圧・低流量環境下、亀裂の影響とこれまでの室内試験よりも実処分場環境を想定した室内試験を行い、流出現象が起こる可能性が高いことを確認した。今後は、地下研究施設における緩衝材流出試験の結果を考慮し、地下環境で確認できない事象の確認を行うとともに、地下環境で流出に対しての影響が大きいと思われる要素について室内試験により検討することが必要である。

7.3.2 地下研究施設における緩衝材流出試験

実際の処分環境に近い地下環境下（処分孔に湧水がある環境）において、各種の試験を実施しデータを取得することにより、緩衝材の水みち形成や流出現象に関する知見を整備・蓄積する事を目的として、試験を行った。今年度実施した試験の結果を以下に記す。

- ・試験体周辺岩盤の透水特性として、試験体定置前の透水係数が概ね $10^{-5} \sim 10^{-6}$ (m/sec) 程度であることを把握した。透水係数 10^{-6} (m/sec) オーダーの結果は、本試験場所である幌延 URL における掘削影響領域と想定される岩盤の透水係数と同等の値であり、注水した水が周辺岩盤へ流れる可能性があることが示唆された。一方、注水試験実施後の試験体の回収直後に水理試験を実施した結果、周辺岩盤の透水係数は、概ね 1.0×10^{-6} m/sec となり、緩衝材の膨潤等の挙動による影響が周辺岩盤の透水性を下げた可能性が示唆された。
- ・注水試験を実施する前に、緩衝材の上方への膨潤変形を抑制する（蓋の設置）条件で、試験体を試験孔内へ定置し、岩盤孔壁と緩衝材の間の隙間（約 2cm）を、あらかじめ緩衝材を膨潤させることによって埋める期間を取った。その間の緩衝材と孔壁の間に設置した土圧計の測定結果から、上部、中部、下部の順に土圧が発現し、約 2 ヶ月（1456 時間）でほぼ一定となった。また、この圧力値は約 1.0MPa～1.4MPa となり、理論式等から、膨潤による止水性能を発揮できる値であると判断できた。
- ・定流量注水試験の結果、注水流量 20～30mL/min と過年度の結果よりも少ない流量の条件下で、注水孔付近から試験体上部へ連通する経路（緩衝材と孔壁間、岩盤中の割れ目など）を通じて、緩衝材の一部が流出する現象が発生した可能性があることがわかった。試験体回収後の緩衝材の表面において、流出経路とみられる場所で珪砂分が多く残留していたことは、室内試験においてパイピング部に珪砂分が多く残留していた現象と類似していた。
- ・注水試験の実施期間全体を通しての水圧の変化や、採水試料のベントナイト濃度の変化に着目すると、注水圧力や試験孔内部の水圧が徐々に上昇していること、および土圧（膨潤圧）が 1MPa を超える値で安定または緩やかな上昇傾向であること、さらに、採水ホース（上蓋の下）

からの採水によるベントナイト濃度が、試験初期を除いて、0～200mg/Lと低い値となり、突出した濃度上昇も見受けられなかったことから、本試験期間において緩衝材の膨潤変形による自己修復機能は進展途中にあることも考えられる。

これまでの原位置試験を通じて得た成果や課題・疑問は、実規模での作業を想定した施工技術の開発への提言、など今後の研究方針の立案に資するものであると考えられる。緩衝材設計に際して考慮すべき要素である緩衝材の流出現象の知見を、条件を設定して行う室内試験と併せて取得し、更なる成果を得られるよう、有意義な原位置試験を計画・実施していくことがより重要になる。

7.4 再冠水時の緩衝材挙動のモデル化・解析評価に係る検討

7.4.1 湧水量の解析的評価方法の検討

本検討は緩衝材の流出に影響を与える懸念がある処分孔の湧水量の評価を、割れ目ネットワークモデルを用いた水理解析により行った。本年度は、昨年度作成した複数の処分坑道を考慮した3次元の割れ目ネットワークモデルを用いて、隣接坑道の埋戻しや処分孔へ緩衝材定置を想定したモデル化を行った。初めに、埋戻しの施工順序を想定して(1)隣接坑道の処分孔の緩衝材定置が完了した場合、(2)緩衝材定置後処分坑道が埋戻された場合、それぞれについて浸透流解析を行い、隣接坑道の埋め戻しや処分孔への緩衝材の定置が処分坑道及び処分孔の湧水量へ与える影響についての検討を行った。また、埋戻し前の解析結果との比較を行い埋戻しの手順が湧水量の変化に与える影響を評価した。次に、複数の処分坑道を考慮した3次元の割れ目ネットワークモデルのうち、最も湧水量が多かったHR08Pモデルを基本とし、処分孔周辺に掘削影響によるゆるみ域(EDZ)をモデル化しない場合とした場合で水理モデルを作成した。このモデルを用いて、処分孔に緩衝材が定置された後のEDZや処分孔を通過する地下水の流量や全水頭分布を算定した。このように緩衝材の膨潤を考慮したモデル化を行うことで、緩衝材定置後の処分孔周辺の地下水挙動の評価を行った。以下に、これらの検討結果から得られた知見をまとめる。

(1) 処分坑道の埋戻し順序に関する知見

処分坑道を埋め戻すことにより、隣接する処分坑道や処分孔の湧水量へ影響を与えることが分かった。処分孔湧水の変化に着目すると、隣接処分坑道に位置する処分孔の定置ではほとんど影響がみられないのに対して、隣接する処分坑道の埋戻しを行うと比較的大きな増加が確認されたことから、隣接の処分孔の定置は問題ないが隣接する処分坑道の埋戻しは緩衝材の定置に支障をきたす可能性があるという知見が得られた。このことから、パネル内の周辺坑道の埋戻しは、緩衝材定置が全て完了した後に行うことが望ましいと考えられる。

(2) 緩衝材の定置に関する知見

EDZ部に岩盤相当の透水係数を設定した場合、緩衝材の透水係数が大きい時には処分孔周辺の

地下水流動は緩衝材中の流れが支配的であるが、透水係数が小さくなるにつれて、緩衝材の水頭が上昇するとともに緩衝材通過流量は減少し、処分孔周辺の岩盤に向かう流れが増加することが示された。EDZ部のパイプにEDZの透水係数を設定した場合、処分孔周辺の地下水流動は、緩衝材の透水係数が大きい時には緩衝材中の流れが支配的であり、透水係数が小さい時にはEDZ中の流れが支配的となった。全体としては上記の様な傾向を示すものの、緩衝材の通過流量や水頭は、割れ目の分布に応じてばらつくことが確認され、処分孔によっては、透水係数の変化に感度が無い場合や割れ目の交差位置を境に水頭が大きく変化する場合などが確認された。

(3) 課題

本研究により、割れ目が地下水流動を規定する岩盤において、施工段階における周辺坑道の状態が処分孔湧水へ与える影響や処分孔周辺の通過流量や地下水圧（全水頭）といった地下水挙動を、割れ目ネットワークモデルであるLT-Flowを用いて評価することが可能であることを示した。

一方、処分孔周辺の地下水挙動は緩衝材のパイピングやエロージョンと関係しており、これをモデル化することは処分の安全性に影響を与える現象の予測と対策の検討において重要であると考えられる。今回の検討では、処分孔周辺の通過流量と全水頭の分布の計算を行ったが、個々のパイプの流量の計算も可能であるため、これを詳細に分析することで割れ目系岩盤における処分孔周辺の流れの方向や流量の分布を求めることも可能である。今後の課題としては、パイピングやエロージョンを生じさせる地下水挙動の解明のため、これらの計算結果と室内試験や原位置試験結果と比較を行い、緩衝材と接している処分孔周辺の地下水挙動を再現することが必要である。

また、これまで廃棄体豎置き処分孔について検討を行ってきたが、横置きPEM方式の処分概念もNUMOにより示されている。この場合、豎置き方式と異なり、緩衝材はPEM容器に収納されているため滴水や高湿度に対し膨潤することはなく、パイピングやエロージョンも生じないため、緩衝材の施工の観点から湧水への対策の重要性は低いと考えられている。しかし、この方式ではPEM容器と処分坑道の隙間を埋め戻す必要があり、処分坑道への湧水がある場合、緩衝材と同様に隙間充填材の流出が処分の安全性に影響を与えることが考えられる。このため、隙間充填材の施工における湧水対策が重要である。坑道周辺へのグラウトや吹付けコンクリートの裏面排水によって湧水を低減する対策が想定されているが、その実証試験は今後の課題とされている。このことから、横置きPEM方式においても、割れ目が地下水流動を支配するような岩盤においては、割れ目ネットワークによる処分坑道周辺の地下水挙動のモデル化による評価が必要と考えられる。

7.4.2 再冠水時の緩衝材の挙動に関わる力学解析手法の検討

本検討は、再冠水期間の緩衝材の浸潤・膨潤による変化を力学解析によって評価するための手法の構築を目的としている。今年度は、圧密特性に関するモデルの高度化に取り組んだ。平均的な乾燥密度が一定であったとしても、どの程度、乾燥密度が不均一に分布するかを予測することが性能評価を行う上で、重要な課題となっている。不均一の度合いは境界条件や初期条件にも左右され、この度合いがどの程度生じるかを定量的に評価することにより、再冠水後の緩衝材内の

密度分布を評価できると考える。不均一の度合いが大きければ、乾燥密度の空間分布に差が生まれ、部分的に緩い領域が発生しうるということになる。この評価において大事なことは、予測解析に用いる構成モデルが広範囲の乾燥密度状態における力学応答の再現性を有しているということである。これがない限り、乾燥密度の不均一性について定量的な考察を深めることは難しい。このために、再冠水過程を経て不飽和状態から飽和状態に至るまでの力学挙動を記述する構成モデルの高度化を図った。

広範囲の乾燥密度状態では、間隙比と圧密応力の対数の関係について直線性を仮定できないことが分かっている。間隙比と圧密応力の対数の関係において、非直線性を仮定した正規圧密曲線を定式化し、媒介変数の導入により、複雑な数理構造を有さない弾塑性構成モデルを構築した。

さらに、膨潤特性に関するモデルの高度化を検討した。既往の実験的研究から、除荷過程、再載荷過程における応力とひずみの関係に対して、除荷に伴う塑性膨張挙動を表現する効果を新たに導入し、モデルの高度化を図った。

本検討により、広範囲の乾燥密度状態において間隙比と圧密応力の関係を解析的に評価できる構成モデルが構築できたことは、今後の緩衝材の力学解析の進展につながることを期待される。

7.4.3 緩衝材の浸潤に関する解析手法の適応性の検討

平成 28 年度と今年度にかけて、本検討の中で行った一次元を模擬した浸潤試験の体系をモデル化して、解析ツール COMSOL を用いて再現解析を行った。昨年度行った一方向からの蒸留水の浸潤試験に関しては、系内の蒸気を考慮することにより浸潤フロント（含水比が 1% 上昇する地点）の進展を再現することができている。今年度は、上下 2 方向からの浸潤フロントの進展について、熱を考慮しない場合と考慮した場合についての解析による評価を行った。また、浸潤の際に空気が系外に逃げない場合（閉鎖系）にした場合の空気圧の上昇についても解析を行った。試験期間について、水の浸潤量は測定結果と解析結果は整合し、また、空気が浸潤する水に溶解することは解析では考慮していないが、試験結果には溶解が含まれることと矛盾しない結果となった。

これまでの試験と解析の結果により、一次元での浸潤挙動に関しては、解析的評価ができるものと考えられることができる。この結果は、解析手法として適切な要素が考慮されていたことを示していると考えられるため、今後、二次元、三次元の解析に反映し高度化していく必要がある。

7.5 緩衝材の設計に関する検討

本検討では緩衝材の設計要件の関連性を整理し、緩衝材の設計要件の関連性や従属関係等を整理した。これにより、緩衝材に求められる機能を満足するための上位の要件として「低透水性」「コロイドろ過性」「製作施工性」、従属的な要件として「自己修復性」「自己シール性」「物理的緩衝性」「微生物影響の防止」を位置付けた。次いで、設計における留意事項として「施工時のすき間に起因した再冠水後の残留密度差が生じる可能性」および「再冠水過程におけるパイピング・エロージョンの発生条件と発生量」をとり挙げ、設計における取扱い方法について検討した。

前者については、既往の研究成果[3]に基づき施工時の隙間に起因する再冠水後の残留密度差を試算・例示した。また、その密度差が水理場へ与える影響について、「低透水性」の指標としたペクレ数の観点で検討し、ペクレ数の算定で用いる地下水流速は、均質膨潤を仮定した平均流速で問題ない見通しを得た。後者については、湧水によるエロージョンへの対応として、許容湧水量を設定した上で、流出分を見込んだ緩衝材密度の設定方法を提示した。

続いて、各設計要件に対して緩衝材の満足すべき仕様範囲の設定方法を示し、仮定した条件に基づく試算結果（「施工時の密度」～「緩衝材厚さ」の関係図）を例示した。その際、「自己シール性」については従来の設計の考え方に代わる新しい設計指標を導入した。また、これらの検討をふまえて、緩衝材の実質的な設計要件は「低透水性」「製作施工性」「自己シール性」「物理的緩衝性」に絞り込まれることを示した。以上をふまえ、緩衝材の設計フローを作成するとともに、工学的対策や施工手順との関連性を含めた、より大きな設計の考え方の概要を示した。さらに、ベントナイト材料に関わらない統一的な指標として、「有効モンモリロナイト密度」の適用性について「低透水性（透水係数）」の観点でデータの収集・整理・評価を行った結果、適用は困難で、使用する材料ごとにデータ取得・評価の方が現実的との結論に至った。

緩衝材の設計に必要なデータについて、クニゲル V1 以外の公開データも含めて対象として整理し、そのばらつきの取扱い方法について言及した。具体的には、透水係数データのばらつきの範囲について検討し、設計において平均値+2 σ （ σ ：標準偏差）の範囲を考慮した場合の仕様の範囲を例示した。また、設計に必要なデータとして海外産ベントナイト材料の「コロイドろ過性」「施工性」「自己シール性」に関わるデータを整理する必要性、および「微生物影響の防止」に関する設計方法の課題について言及した。

以上のように、本検討では緩衝材の設計施工に関わる現状の知見を整理し、設計方法に関する提案を行った。ただし、緩衝材の設計においては施工誤差等も考慮する必要性があり、考慮すべき湧水についてはサイト条件や施工手順、工学的対策とも関連するため、今後も総合的な観点からの検討が必要である。

第7章 参考文献

- [1] A.Iizuka, H.Ohta: A Determination Procedure of Input Parameters in Elasto-Viscoplastic Finite Element Analysis, Soils & Foundations, Vol.27, No.3, pp.71-87 (1987).
- [2] <http://www.kesco.co.jp/comsol/index.html>など
- [3] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 28 年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書（第 2 分冊）,2017
- [4] 杉田 裕, 菊池広人:人工バリアにおける 緩衝材の隙間膨潤挙動に関する基礎試験, JNC TN 8430 2002-003, 2002
- [5] （公財）原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 26 年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書（第 2 分冊）,2015