

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

平成29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のうち、処分システム工学確証技術開発 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	研究開発の背景 .....	1-1
1.2	研究開発の目的 .....	1-2
1.3	試験計画 .....	1-3
第2章	再冠水過程を対象とした緩衝材の研究 .....	2-1
2.1	基本方針 .....	2-1
2.2	研究経緯 .....	2-2
2.3	再冠水時に発生する現象の整理 .....	2-2
2.3.1	再冠水時に発生する現象の整理方法 .....	2-2
2.3.2	緩衝材性能に影響を与える主な再冠水時の挙動 .....	2-5
第3章	緩衝材への地下水浸潤に関わる調査 .....	3-1
3.1	緩衝材への地下水浸潤状況の評価 .....	3-1
3.1.1	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） .....	3-1
(1)	試験の目的 .....	3-1
(2)	既存の研究 .....	3-1
(3)	試験方法 .....	3-2
(4)	試験結果 .....	3-4
3.1.2	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（膨潤変形条件） .....	3-12
(1)	試験の目的 .....	3-12
(2)	試験方法 .....	3-12
(3)	試験結果 .....	3-14
3.2	施工品質（密度差）が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響の調査 .....	3-19
3.2.1	研究の背景と目的 .....	3-19
3.2.2	密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響 .....	3-19
(1)	試験方法 .....	3-19
(2)	試験結果（蒸留水ケース） .....	3-21
1)	膨潤量 .....	3-21
2)	供試体解体結果 .....	3-25
a	乾燥密度 $1.4\text{Mg}/\text{m}^3$ - $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$ ケース .....	3-25
b	乾燥密度 $1.5\text{Mg}/\text{m}^3$ - $1.7\text{Mg}/\text{m}^3$ ケース .....	3-27
(3)	試験結果（NaCl 水溶液ケース） .....	3-29
1)	膨潤量 .....	3-29
3.2.3	応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響 .....	3-32
(1)	試験方法 .....	3-32
(2)	試験結果（蒸留水のケース） .....	3-36

1)	膨潤量 .....	3-36
2)	供試体解体結果 .....	3-38
a	正規圧密供試体 (1.6Mg/m <sup>3</sup> ) の解体 .....	3-38
b	過圧密供試体 (1.6Mg/m <sup>3</sup> ) の解体 .....	3-39
(3)	試験結果 (NaCl 水溶液ケース) .....	3-41
1)	膨潤量の経時変化 .....	3-41
2)	膨潤圧の経時変化 .....	3-42
3)	給水状況 .....	3-43
(4)	残留密度差の理論的解釈に資するデータ取得 .....	3-44
1)	試験方法 .....	3-44
2)	試験結果 .....	3-46
3.3	施工品質による密度分布の均質化検討 (2次元土槽試験) .....	3-49
3.3.1	施工品質 (密度差) の影響試験の目的 .....	3-49
3.3.2	試験方法 .....	3-49
3.3.3	試験結果 (0.5M-NaCl 水溶液、ブロック定置とペレット充填併用ケース) .....	3-51
3.4	浸潤による間隙空気の移行試験 .....	3-59
3.4.1	目的と概要 .....	3-59
3.4.2	試験方法 .....	3-61
(1)	緩衝材の製作方法 .....	3-61
(2)	浸潤による間隙空気の移行試験の手順 .....	3-61
3.4.3	試験結果 .....	3-63
(1)	流量制御過程 .....	3-63
(2)	圧力制御過程 .....	3-66
<b>第4章</b>	<b>再冠水時の緩衝材の変質に関わる検討</b> .....	<b>4-1</b>
4.1	Ca型化が緩衝材に及ぼす影響の検討 .....	4-1
4.1.1	試験の目的及び概要 .....	4-1
4.1.2	試験方法 .....	4-1
(1)	使用材料 .....	4-1
(2)	試験条件 .....	4-1
(3)	供試体作成方法及び試験方法 .....	4-2
4.1.3	試験結果 .....	4-3
4.2	鉄が緩衝材に及ぼす影響の検討 .....	4-6
4.2.1	検討の目的 .....	4-6
4.2.2	緩衝材化学変質に関する変質物質の分析 .....	4-8
(1)	分析の目的 .....	4-8
(2)	分析方法 .....	4-9
(3)	試料の前処理と分析手法 .....	4-9
1)	通水試験後の試料 .....	4-9

2)	バッチ浸漬試験後の試料.....	4-12
(4)	EPMA 分析.....	4-13
1)	分析方法.....	4-13
2)	通水試験後試料.....	4-14
a	元素マッピング.....	4-14
b	Fe プロファイル.....	4-17
c	スポット分析.....	4-17
3)	バッチ浸漬試験後試料.....	4-18
a	元素マッピング.....	4-18
b	Fe プロファイル.....	4-21
c	スポット分析.....	4-21
(5)	FESEM 観察及び EDS 分析.....	4-22
1)	通水試験後試料.....	4-22
a	観察.....	4-22
b	スメクタイト分析結果.....	4-25
2)	バッチ浸漬試験後試料.....	4-27
a	観察.....	4-27
b	スメクタイト分析結果.....	4-28
(6)	マイクロ XRD 分析.....	4-28
1)	通水試験後試料.....	4-28
2)	バッチ浸漬試験後試料.....	4-30
(7)	層間陽イオン.....	4-32
(8)	鉄との相互作用による変質メカニズム.....	4-34
4.2.3	化学変質による膨潤性能低下の検証.....	4-36
(1)	試験の概要.....	4-36
(2)	試験結果.....	4-40
1)	Na 型ベントナイト.....	4-41
2)	Ca 型ベントナイト.....	4-43
3)	堆積岩盤湧水模擬ケース.....	4-44
4)	結晶質岩盤湧水模擬ケース.....	4-46
<b>第 5 章</b>	<b>緩衝材の流出に関する検討.....</b>	<b>5-1</b>
5.1	緩衝材表面近傍の止水性に関する室内試験.....	5-1
5.1.1	小型セルによる緩衝材流出試験.....	5-2
(1)	試験概要.....	5-3
(2)	試験ケース.....	5-4
(3)	試験結果（多孔質セル+蒸留水のケース）.....	5-5
1)	透水係数 $10^{-8}$ m/s の多孔質セルの場合.....	5-5
2)	透水係数 $10^{-10}$ m/s の多孔質セルの場合.....	5-6

3)	総流量とエロージョン質量の関係にセルの透水性が及ぼす影響.....	5-7
5.1.2	水みちの断面積と流速・乾燥密度の関係取得試験.....	5-8
(1)	試験概要.....	5-8
(2)	試験ケース.....	5-11
(3)	試験結果.....	5-11
5.1.4	工学規模パイピング・エロージョン試験.....	5-17
(1)	試験概要.....	5-17
(2)	試験ケース.....	5-18
(3)	試験結果.....	5-18
1)	試験状況.....	5-18
2)	解体状況.....	5-22
5.1.5	高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験.....	5-24
(1)	試験概要.....	5-24
(2)	試験ケース.....	5-25
(3)	試験結果.....	5-27
5.1.6	まとめ.....	5-28
(1)	小型セルによる緩衝材流出試験.....	5-28
(2)	水みちの断面積と流速・乾燥密度の関係取得試験.....	5-28
(3)	工学規模流出試験.....	5-29
(4)	高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験.....	5-29
5.2	地下研究施設における緩衝材流出試験.....	5-30
5.2.1	目的と概要.....	5-30
5.2.2	試験設備.....	5-31
5.2.3	試験準備・予備試験.....	5-33
(1)	緩衝材ブロックの製作.....	5-33
1)	混合土.....	5-33
a	使用材料.....	5-33
b	含水比.....	5-33
2)	緩衝材ブロック.....	5-34
a	ブロック仕様.....	5-34
b	ブロック形状.....	5-35
(2)	緩衝材定置治具および蓋の製作.....	5-35
(3)	湧水量測定.....	5-37
1)	湧水量測定の概要.....	5-37
2)	測定ケースの設定.....	5-37
3)	湧水量測定結果.....	5-38
(4)	採水試料の吸光度分析.....	5-40
1)	分析方法概要.....	5-40

2)	使用機械 .....	5-40
3)	キャリブレーション .....	5-42
5.2.4	長期の流出試験 .....	5-43
(1)	緩衝材の流出確認 .....	5-43
(2)	緩衝材の流出量 .....	5-43
(3)	試験終了後の緩衝材の状態 .....	5-45
(4)	緩衝材の密度測定・含水比測定 .....	5-48
1)	コアを対象とした土質試験の主な結果 .....	5-48
2)	ゲル部を対象とした土質試験の主な結果 .....	5-48
5.2.5	Case1 の流出試験 .....	5-52
(1)	試験準備 .....	5-52
1)	注水設備および計測設備の設置 .....	5-52
2)	土圧計の設置 .....	5-54
a	試験体および上部／下部土圧計の組立・設置 .....	5-54
b	中部土圧計の設置 .....	5-55
3)	採水設備の設置 .....	5-56
(2)	注水試験 .....	5-57
1)	試験条件 .....	5-57
2)	試験結果 .....	5-58
a	膨潤圧 .....	5-58
b	水圧／注水量流量 .....	5-59
c	緩衝材の流出量 .....	5-60
(3)	試験後の緩衝材の状態 .....	5-60
(4)	緩衝材の密度測定・含水比測定 .....	5-62
5.2.6	Case2 の流出試験 .....	5-64
(1)	試験準備 .....	5-64
1)	注水設備および計測設備の設置 .....	5-64
2)	土圧計の設置 .....	5-64
3)	孔壁と緩衝材の隙間を対象としたベントナイトペレットの設置 .....	5-64
4)	採水設備の設置 .....	5-64
(2)	注水試験 .....	5-64
1)	試験条件 .....	5-64
2)	試験結果 .....	5-65
a	膨潤圧 .....	5-65
b	水圧／注水量流量 .....	5-66
c	緩衝材の流出量 .....	5-67
(3)	試験後の緩衝材の状態 .....	5-67
(4)	緩衝材の密度測定・含水比測定 .....	5-69

5.2.7	Case3 の流出試験 .....	5-71
(1)	試験準備 .....	5-71
1)	注水設備および計測設備の設置 .....	5-71
2)	土圧計の設置 .....	5-71
3)	採水設備の設置 .....	5-71
(2)	注水試験 .....	5-71
1)	試験条件 .....	5-71
2)	試験結果 .....	5-71
a	膨潤圧 .....	5-71
b	水圧／注水量流量 .....	5-72
c	緩衝材の流出量 .....	5-74
(3)	試験後の緩衝材の状態 .....	5-75
(4)	緩衝材の密度測定・含水比測定 .....	5-78
5.2.8	総合評価 .....	5-80
5.2.9	まとめ .....	5-82
<b>第 6 章</b>	<b>再冠水時の緩衝材のモデル化・解析に関わる検討</b> .....	<b>6-1</b>
6.1	緩衝材施工品質に関する解析的検討 .....	6-1
6.1.1	研究の概要 .....	6-1
(1)	研究の背景 .....	6-1
(2)	研究の目的 .....	6-1
(3)	全体研究計画 .....	6-1
(4)	本年度の検討内容 .....	6-2
1)	坑道掘削・定置・埋戻しの順序の整理 .....	6-3
2)	複数の処分坑道が処分孔の湧水に与える影響評価 .....	6-3
3)	グラウトの施工手順を考慮した処分孔湧水の評価 .....	6-3
4)	緩衝材の定置後における処分孔への湧水量の評価 .....	6-4
6.1.2	坑道掘削・定置・埋戻しの順序の整理 .....	6-4
(1)	検討方針 .....	6-4
(2)	処分場設計の基本的な考え方 .....	6-4
1)	処分場の設計フロー .....	6-4
2)	緩衝材の設計 .....	6-7
3)	地下施設の設計 .....	6-10
(3)	処分場建設および操業の基本的な考え方 .....	6-13
1)	縦置き・ブロック方式（パネル型） .....	6-13
2)	横置き・PEM 方式（フィッシュボーン型） .....	6-14
(4)	掘削～定置～埋戻しの施工順序 .....	6-15
(5)	操業期間中に緩衝材品質に与える湧水の影響 .....	6-16
1)	定置時における許容時間湧水量 .....	6-16

2)	定置後における許容時間湧水量 .....	6-17
(6)	工学的湧水対策 .....	6-18
1)	グラウトによる湧水量低減 .....	6-18
2)	予備区画の設定 .....	6-19
(7)	坑道掘削・定置・埋戻しの順序の整理結果のまとめ .....	6-21
1)	湧水の影響要因の整理 .....	6-21
2)	対象とする水理モデルに関する考察 .....	6-22
6.1.3	複数の処分坑道が処分孔の湧水に与える影響評価 .....	6-23
(1)	検討方針 .....	6-23
(2)	水理地質構造モデルの構築 .....	6-24
1)	割れ目ネットワークのモデル化 .....	6-24
2)	処分坑道、掘削影響領域のモデル化 .....	6-25
3)	透水性の設定 .....	6-27
4)	境界条件の設定 .....	6-28
(3)	処分坑道掘削後の湧水量についての検討 .....	6-28
1)	検討内容 .....	6-28
2)	解析結果（湧水量データ） .....	6-28
3)	処分坑道数と湧水量の関係についての考察 .....	6-31
4)	境界条件の妥当性に関する考察 .....	6-33
5)	処分坑道壁面の湧水量分布とその傾向 .....	6-34
6)	解析結果のまとめ .....	6-36
(4)	処分孔掘削後の湧水量についての検討 .....	6-37
1)	検討方法 .....	6-37
2)	解析結果（湧水量データ） .....	6-37
3)	処分坑道湧水量に関する考察 .....	6-39
4)	処分坑道および処分孔の合計湧水量に関する考察 .....	6-40
5)	処分坑道数の違いによる湧水量の比較 .....	6-41
6)	坑道湧水量の分布 .....	6-43
7)	処分孔湧水量の分布 .....	6-46
8)	解析結果のまとめ .....	6-49
6.1.4	グラウトの施工手順を考慮した処分孔湧水の評価 .....	6-50
(1)	検討内容 .....	6-50
(2)	グラウトのモデル化の違いによる比較 .....	6-50
1)	グラウトのモデル化 .....	6-50
2)	湧水量の比較 .....	6-53
(3)	グラウトの施工順序による比較 .....	6-55
1)	施工順序の設定方法 .....	6-55
2)	解析結果（処分坑道湧水量） .....	6-55



3)	解析結果（処分孔湧水量） .....	6-56
4)	湧水量の変化に関する考察 .....	6-65
5)	周辺処分孔への湧水の回り込みに関する考察 .....	6-68
(4)	解析結果のまとめ .....	6-69
6.1.5	緩衝材の定置後における処分孔への湧水量の推定 .....	6-70
(1)	検討方針 .....	6-70
(2)	緩衝材のモデル化 .....	6-70
(3)	緩衝材通過流量の比較 .....	6-72
(4)	緩衝材の圧力分布 .....	6-73
(5)	課題の整理 .....	6-74
6.1.6	まとめと今後の課題 .....	6-74
(1)	検討成果のまとめ .....	6-74
(2)	今後の検討課題 .....	6-76
6.2	再冠水時の緩衝材の挙動のモデル化の検討 .....	6-79
6.2.1	緩衝材への地下水浸潤状況の評価に関する検討 .....	6-79
(1)	工学技術への反映 .....	6-79
(2)	解析技術への反映 .....	6-79
6.2.2	施工品質（密度差）が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響の調査に関する検討 .....	6-79
(1)	力学に立脚した残留密度差の理論的解釈 .....	6-79
1)	概要 .....	6-79
2)	既往の成果による残留密度差の理論的解釈 .....	6-80
(2)	工学技術への反映 .....	6-83
1)	概要 .....	6-83
2)	試験結果に基づく密度差の工学技術への反映 .....	6-84
(3)	解析技術への反映 .....	6-86
6.2.3	浸潤による間隙空気の移行に関する検討 .....	6-89
(1)	工学技術への反映 .....	6-89
(2)	解析技術への反映 .....	6-90
6.2.4	Ca 型化が緩衝材に及ぼす影響の検討 .....	6-91
(1)	工学技術への反映 .....	6-91
(2)	解析技術への反映 .....	6-91
6.2.5	緩衝材の流出に関する検討 .....	6-92
(1)	工学技術への反映 .....	6-92
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 .....	6-92
2)	閉鎖を早める対策 .....	6-93
3)	流量を減らす対策 .....	6-94
4)	緩衝材の乾燥密度（乾燥質量）を高める対策 .....	6-94
5)	試験結果に基づく対策フロー .....	6-95

6)	湧水量制御技術に関する文献調査 .....	6-98
(2)	解析技術への反映 .....	6-100
6.3	再冠水時の緩衝材の挙動に関わる力学解析手法の検討 .....	6-101
6.3.1	概要 .....	6-101
6.3.2	土／水／空気連成初期値境界値問題の概要 .....	6-101
(1)	場の支配方程式 .....	6-101
(2)	ベントナイト緩衝材の弾塑性構成モデル[10] .....	6-104
6.3.3	密度の異なる供試体に対する直列均質化試験シミュレーション .....	6-111
(1)	試験の概要 .....	6-111
(2)	解析手法および解析条件 .....	6-114
(3)	解析結果 .....	6-116
6.3.4	応力履歴の異なる供試体に対する直列均質化試験シミュレーション .....	6-119
(1)	試験の概要 .....	6-119
(2)	解析手法および解析条件 .....	6-123
(3)	解析結果 .....	6-127
6.3.5	長尺ベントナイト供試体の浸潤試験シミュレーション .....	6-134
(1)	試験の概要と結果 .....	6-134
(2)	解析手法および解析条件 .....	6-134
(3)	解析結果 .....	6-137
6.3.6	まとめ .....	6-141
6.4	緩衝材の浸潤に関する解析手法の適応性の検討 .....	6-142
6.4.1	概要 .....	6-142
6.4.2	SKB で行った試験を対象とした解析 .....	6-142
6.4.3	一次元浸潤試験のモデリング .....	6-143
(1)	構成式と境界条件 .....	6-144
(2)	物性値 .....	6-145
(3)	結果 .....	6-147
	<添付資料-A>	
	<添付資料-B>	
<b>第7章</b>	<b>緩衝材施工方法に関する検討 .....</b>	<b>7-1</b>
7.1	背景と目的 .....	7-1
7.2	緩衝材機能に係わる文献調査 .....	7-1
7.2.1	実施内容 .....	7-1
7.2.2	調査の対象とした文献 .....	7-1
7.2.3	実施手順 .....	7-2
(1)	「文献リスト」の作成 .....	7-2
(2)	「文献シート」の作成 .....	7-3
7.2.4	緩衝材機能に係わる文献調査結果 .....	7-4

7.3	緩衝材の仕様、施工に関する知見の整理.....	7-4
7.3.1	実施内容 .....	7-4
7.3.2	実施手順 .....	7-4
7.3.3	実施手順 .....	7-5
7.3.4	緩衝材の仕様、施工に関するロジックツリーの構築 .....	7-5
7.3.5	わが国における緩衝材の仕様、施工に関する知見の概要.....	7-7
(1)	設計関係 .....	7-7
1)	JAEA 第 2 次取りまとめにおける緩衝材の設計の考え方.....	7-7
a	安全確保のための要件 (JAEA 第 2 次取りまとめ IV-143) .....	7-7
b	人工バリアが成立するための要件 (JAEA 第 2 次取りまとめ IV-144) .....	7-8
c	緩衝材の仕様設定 (JAEA 第 2 次取りまとめ IV-14) .....	7-8
2)	NUMO セーフティケースの緩衝材の設計の考え方 .....	7-9
a	安全機能に係る要件 (NUMO セーフティケース 資料 4 (3) 処分場の設計と工 学技術 P4-13)) .....	7-9
b	実現性に関わる要件 (NUMO セーフティケース 資料 4 (3) 処分場の設計と工 学技術 P4-13) .....	7-9
c	緩衝材の評価項目 (NUMO セーフティケース 資料 4 (3) 処分場の設計と工学 技術 P4-14) .....	7-9
d	設計要件を満足する緩衝材の仕様範囲 (NUMO セーフティケース 資料 4 (3) 処分場の設計と工学技術 P4-21) .....	7-10
(2)	施工関係 .....	7-10
1)	JAEA 第 2 次取りまとめにおける緩衝材の施工要件 .....	7-10
a	緩衝材の製作方法と目標値.....	7-10
b	緩衝材の膨出対策 .....	7-11
2)	NUMO セーフティケースにおける緩衝材の施工要件.....	7-11
a	許容できる緩衝材流出量 (NUMO セーフティケース 参考資料 許容できる緩 衝材の流出量の設定 P4-83) .....	7-11
b	許容湧水量の基準値 (NUMO セーフティケース 参考資料 許容湧水量の基準 値の設定 P4-84) .....	7-11
c	許容湧水量 (緩衝材の滴水対策の観点から) (NUMO セーフティケース 参考資 料 許容湧水量の基準値の設定 P4-85) .....	7-11
d	処分孔利用率 (NUMO セーフティケース 参考資料 EDF の評価：処分孔利用率 の算定 P.4-44) .....	7-12
(3)	確認 (モニタリング) 関係 .....	7-12
7.3.6	スウェーデンにおける緩衝材の仕様、施工に関する知見の概要.....	7-12
(1)	設計関係 .....	7-12
1)	設計について .....	7-12
2)	安全機能について .....	7-14

3)	SR-Site 報告書のヒエラルキーについて .....	7-15
4)	緩衝材に関するプロダクション報告書 .....	7-16
(2)	施工関係 .....	7-23
(3)	確認（モニタリング）関係 .....	7-24
1)	地下水のモニタリング .....	7-26
2)	地震モニタリング .....	7-26
7.3.7	まとめ .....	7-27
7.4	総合的評価のための検討と課題の整理 .....	7-27
7.4.1	実施内容 .....	7-27
7.4.2	実施手順 .....	7-28
7.4.3	全体を統合したロジックツリーの構築 .....	7-28
(1)	ロジックツリーの構築 .....	7-28
(2)	主命題に対する全体のロジックツリー .....	7-33
7.4.4	検討の前提条件 .....	7-35
7.4.5	概略評価の実施 .....	7-35
(1)	概略評価のためのパラメータの設定の考え方 .....	7-35
(2)	各分岐の重みの設定 .....	7-35
(3)	証拠の入力 .....	7-37
(4)	評価のまとめ .....	7-39
7.4.6	概略評価のまとめ .....	7-39
7.4.7	評価の定量化のための方法の検討 .....	7-40
(1)	ESL について .....	7-40
(2)	ESL の解析手順 .....	7-41
(3)	ESL による感度解析のイメージ .....	7-43
(4)	ESL 解析結果 .....	7-44
7.5	処分場の概念に関する提案 .....	7-48
7.5.1	処分場概念の最適化に関する考え方 .....	7-48
7.5.2	処分場概念に関する選択肢（例） .....	7-49
(1)	廃棄体一体の横置き処分 .....	7-49
1)	現状の選択肢の課題 .....	7-49
2)	提案する選択肢 .....	7-50
(2)	廃棄体定置位置の地質環境に応じたカスタマイズ方法 .....	7-52
1)	現状の選択肢の課題 .....	7-52
2)	提案する選択肢 .....	7-53
(3)	斜めプラグの施工 .....	7-55
1)	現状の選択肢の課題 .....	7-55
2)	提案する選択肢 .....	7-56
7.5.3	KBS-3H の概念 .....	7-58

<添付資料 A>

<添付資料 B>

<添付資料 C>

第8章	まとめ	8-1
8.1	はじめに	8-1
8.2	平成28年度の成果	8-2
8.2.1	緩衝材への地下水浸潤に関わる調査	8-2
(1)	緩衝材の地下水浸潤状況の評価	8-2
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）	8-2
2)	長尺ベントナイト供試体を用いた一次元速度取得（変形条件）	8-2
(2)	施工品質（密度差）が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響の調査	8-3
1)	密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響	8-3
(a)	試験結果（蒸留水のケース）	8-3
(b)	試験結果（NaCl水溶液ケース）	8-4
2)	応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響	8-4
(3)	施工品質による密度分布の均質化の検討	8-5
(4)	湿潤による間隙空気の移行調査	8-5
8.2.2	再冠水時の緩衝材の変質に関わる検討	8-6
(1)	Ca型化と飽和の可逆性検討	8-6
(2)	鉄が緩衝材に及ぼす影響の検討	8-6
1)	緩衝材化学変質に関する変質物質の分析	8-7
2)	化学変質による膨潤性能低下の検証	8-7
8.2.3	緩衝材の流出に関する検討	8-8
(1)	緩衝材表面近傍の止水性に関する室内試験	8-8
1)	小型セルによる緩衝材流出試験	8-8
2)	水みちの断面積と流速・乾燥密度の関係取得試験	8-8
3)	工学規模流出試験	8-9
4)	高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験	8-9
(2)	地下研究施設における緩衝材流出試験	8-10
8.2.4	再冠水時の緩衝材のモデル化・解析に関わる検討	8-11
(1)	緩衝材施工品質に関する解析的検討	8-11
(2)	再冠水時の緩衝材の挙動のモデル化の検討	8-12
(3)	再冠水時の緩衝材の挙動に関わる力学解析手法の検討	8-12
(4)	緩衝材の浸潤に関する解析手法の適応性の検討	8-13
8.2.5	緩衝材施工方法に関する調査	8-13

# 第1章 はじめに

## 1.1 研究開発の背景

人工バリアの一部である緩衝材には、放射性物質の移行抑制などの機能や、制作・施工性を考慮した技術要件が設定されている [1]。そういった機能や技術要件に関連する緩衝材の品質指標である「乾燥密度」、「化学組成」、「形状」は、定置直後の緩衝材の施工品質と、その後の再冠水に至る期間における環境の「温度」、「湧水」、「地下水組成」の影響を受ける。

地層処分施設の定置時は、坑道内の湧水や滴水に対する対策を講じられるため、緩衝材の化学変質に必要な間隙水がほとんど存在しない不飽和状態にある。このため、建設・操業時の緩衝材は、飽和度が上昇することによる力学的な挙動が支配的である。一方、再冠水後においては、緩衝材に作用する外力は天然バリアのクリープ変形程度であり、化学的な変質が緩衝材の変質について支配的である。この化学的な変質は非常に緩慢であり、室内試験の時間スケールの中では定常状態と見なせる場合が多い。このような理由から、これまでの放射性廃棄物地層処分施設の緩衝材の室内試験による研究は、比較的短時間に定常状態と見なせる定置直後の検討や、定常状態と見なせる再冠水後の緩衝材の長期性能評価に関するものが大半である。

しかしながら、緩衝材の構築後から再冠水終了後までの期間（力学的挙動が支配的な状態から化学的な挙動が支配的な状態への過渡的段階）においては、地下水の浸潤によってベントナイトの膨潤が生じるなど、力学的な釣合い場が崩れ別の釣合い状態へ遷移する。さらにグラウトなどの影響による Ca イオンを含む地下水の浸潤によってベントナイト中のモンモリロナイトが Ca 型化するなどの化学的変質が生じ始める。再冠水時は、水理、力学、化学的な挙動が全て別の安定な系へ変遷していく過程であり、室内試験規模で検証することが非常に難しく、現状では十分な検討がなされていない。このため、定置直後から長期性能までの緩衝材の性能を連続的に評価することが難しく、定置直後に要求性能を満足している緩衝材が、長期性能の観点から緩衝材に求められる性能を満足できない可能性も懸念される。

以上のような理由から、定置直後の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を定量的に評価することによって、定置直後から再冠水後（長期性能評価の初期状態）までの緩衝材の性能を連続的に評価する必要があると考えた。

また、不飽和状態での緩衝材における水の移行と、飽和状態における水の移行は異なるものであることが指摘されている。不飽和状態では周囲の岩盤からの水の吸収による緩衝材のサクション（間隙水の負圧）や膨潤圧、乾燥密度が変化する。また、岩盤からの地下水の流入量によっては緩衝材の流出が発生し、長期の安全性能に影響を与える。一方、緩衝材の飽和状態では緩衝材の浸透性は非常に低いため、水、溶存種の重要なメカニズムは拡散となる。したがって緩衝材の膨潤挙動については不飽和状態と飽和状態を分けて取り扱う必要がある。

## 1.2 研究開発の目的

「人工バリア品質／健全性評価手法の構築 - 緩衝材」(以下「本研究」と称す。)の目的は、緩衝材施工品質や再冠水時の現象を考慮した緩衝材設計の考え方や、その根拠となる実験及び解析結果を提示することである。

地層処分における緩衝材については、定置直後の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、再冠水時の挙動を定量的に評価することによって、定置直後から再冠水後(長期性能評価の初期状態)までの緩衝材の性能を連続的に評価する必要がある。本研究では、緩衝材の再冠水挙動に影響を及ぼす因子として、

- ・ 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)

を取り上げた。これらの施工時の緩衝材密度の品質が再冠水時に、どのように変遷するかを把握するために以下のデータを取得してきた。

- ・ 膨潤挙動
- ・ 化学変質 (イオン交換)
- ・ 力学性能変化
- ・ 地下水浸潤 (流入量、液種)
- ・ ガス移行 (間隙空気移行)
- ・ 熱影響

本研究はこのようなデータを踏まえ、緩衝材の「バリア性能」及び「その他の人工バリアの長期健全性の維持性能」に対し、再冠水後の長期性能の観点から施工技術の評価項目に数値範囲を与えること、つまり、施工品質への仕様の提示 (例えば、均質化すると見做せる密度差の範囲) を目的としている。これらの結果は、海外の実施機関 (SKB 等) の先行研究成果も踏まえ、施工方法の選定や施工管理項目の設定に反映される (図 1.2-1)。

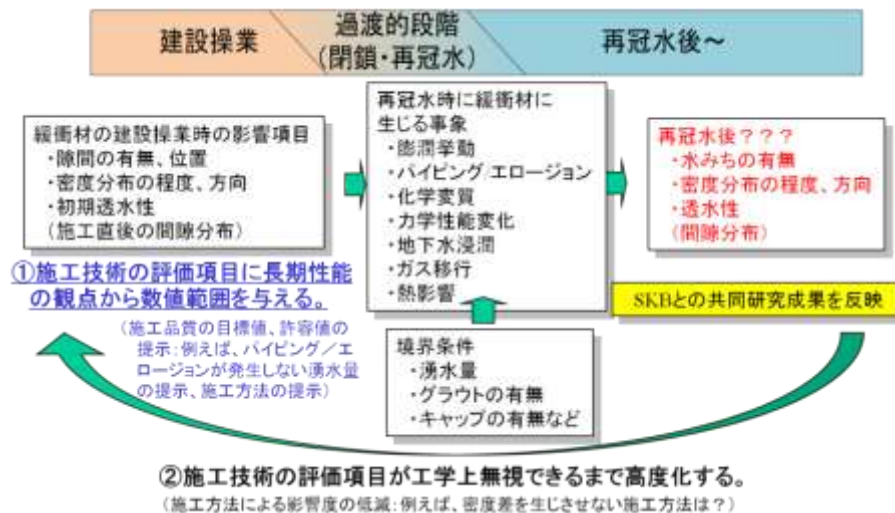


図 1.2-1 再冠水時に緩衝材に生じる事象を踏まえた建設操作時の影響項目の評価とその反映先

さらに、図中①で提示した数値範囲に抑えることができる技術選択肢を拡充するため、②施工技術の評価項目が工学上無視できるまで高度化すること、つまり、施工方法による影響度の低減（例えば、密度差を生じさせない施工方法の開発）についても検討している。緩衝材施工技術の高度化によって施工技術が緩衝材の長期性能に及ぼす影響を低減できれば長期性能評価技術の精度が向上するものと考えられる。

本研究は、再冠水後の長期間に亘る“緩衝材の性能を適切に確保”するために図 1.2-2 に示すように長期性能の初期条件として“再冠水後の緩衝材の品質”に大きく影響する“施工時の品質”、“地下水の浸潤等再冠水時の影響”に関して検討を行う。再冠水後の緩衝材の品質を評価するためには、“定置直後の施工品質”を勘案した上で、“地下水の浸潤等再冠水時の影響”を適切に評価することが必要であり、“定置直後の施工品質”は、設計仕様、施工材料、施工（建設操業）技術、施工精度及び原位置における施工条件（湧水圧・量等）によって制約を受けるためである。

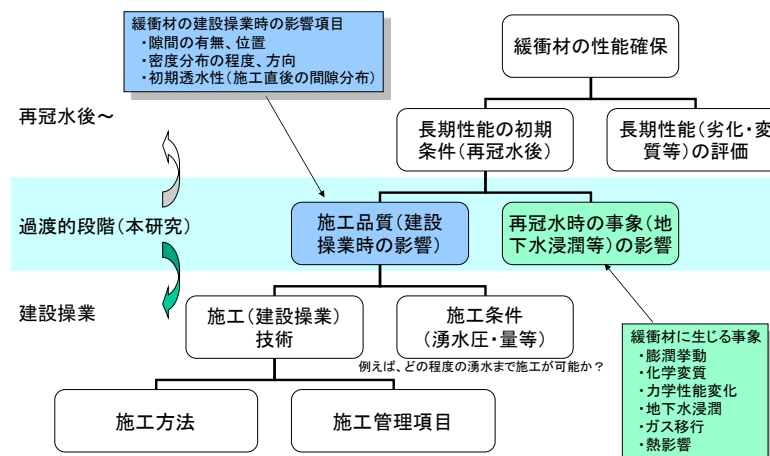


図 1.2-2 本研究の位置づけ

### 1.3 試験計画

平成 25 年度に策定した 5 年間の調査研究計画を基に、これまでの試験で得ることができた新たな知見等を考慮し一部更新を行った計画を表 1.3-1 に示す。

クニゲル V1 70wt%+ケイ砂 30wt%の緩衝材が、地下環境において所定の健全性を保持できることを確認するために、理想的な系から現実で予想される複雑な処分環境（工学規模、湧水量や水質等）を考慮した研究を行っている。緩衝材の性能劣化事象として懸念される緩衝材流出現象に対しては、緩衝材の工学的対策として、平成 25 年度に検討した方法について有効性を評価するとともに、例えば、天然の岩盤からの湧水による流出現象を評価するなどの検討も実施しなければならない。

さらに、埋め戻し材やプラグを含む緩衝材近傍の部材について調査を行う。一方、海外と比較して日本では地下での湧水量が多いことが予想されており、湧水量を制御するためのグラウトや、人工注水等の工学的対策についても調査を行い、人工バリア品質評価モデル、健全性評価モデルを反映した人工バリア設計・製作・施工手法の考え方についても提示する。



実施にあたっては以下の4項目について、すなわち、①緩衝材の建設作業時の影響の項目の調査・検討、②過渡的段階に緩衝材に生じる現象の評価、③施工技術の高度化による影響低減検討、④人工バリア全体としての設計・施工仕様の策定に資する指標の整備について検討を実施する。

これまでの研究開発において、緩衝材の製作・施工技術について実規模試験などを通してその実現性が示された一方、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において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が示されている。そのため、処分環境（湧水量や水質等）を考慮した調査・検討を実施するとともに、緩衝材の性能劣化事象として懸念される緩衝材流出現象に対して、工学的対策の提示に向けた調査・検討を実施する。また、これらの結果に基づき、緩衝材の品質評価手法の構築に向けた検討を行い、緩衝材が安全機能を満足していることを判断するための指標の具体化の検討を進める。

平成27年度までに、再冠水時における緩衝材には、密度差分布が残留することや応力履歴の影響が残ること、また、地下水湧水量によっては緩衝材流出現象が発生することを確認するとともに、その挙動をモデル化するためのデータ取得を行った。一方で、複合的な系である幌延深地層研究センターの地下坑道の湧水環境下で緩衝材の流出試験を行うことにより、水みちの形成を確認した。

平成28年度は、再冠水時の緩衝材挙動の理解を深めるための試験を室内試験、地下での試験を行う。また、これまでに取得した試験データに基づいて現象をモデル化し、得られたモデルを用いて、緩衝材の浸潤挙動、湧水の影響、工学的な対策の効果についての解析的な評価方法を検討する。さらに、緩衝材の設計・施工仕様の策定に資する判断指標の具体化に向けて検討を進める。

表 1.3-1 平成 25 年度から平成 29 年度の調査研究計画

		H25	H26	H27	H28	H29
②再冠水挙動の調査・検討		H25		H26	H27	H28
②再冠水挙動の調査・検討		H25		H26	H27	H28
i	施工品質(密度分布)の均質化試験 (0.5NaCl, 人工海水(0.5M NaCl+0.5/3M CaCl <sub>2</sub> ))	0.5M NaCl溶液の場合: ①密度均質化の検討, ②応力履歴の検討		蒸留水, 0.5/3M CaCl <sub>2</sub> 溶液の場合継続: ①密度均質化の検討, ②応力履歴の検討		
ii	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		
iii	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 <sup>3</sup> ~2.0Mg/m <sup>3</sup> 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塩水環境下でのe-log P曲線の取得, ④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)		
		①間隙空気の移行に関する調査・検討		②熱影響を受けた間隙空気の移行に関する調査・検討		
③緩衝材流出に対する工学的対策に関する調査・検討						
i	小規模/工学規模パイピング試験(海水相当の液種), 限界流速確認試験	①0.5M NaCl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)	③0.5M NaCl+0.5/3M CaCl <sub>2</sub> の場合のエロージョン量の把握 ④ブロック(流入量, 液種) ⑤1.8Ms/1.6Ms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 ⑧1.4Ms/1.2Msの限界流速	⑨工学的対策確認試験 ⑩0.8Ms/0.6Msの限界流速	1処分孔当たりのエロージョン量の範囲設定
ii	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試験結果の評価
iii	地下水流動解析		①地下水水位低下工法の効果検討/地下水流動解析	②繰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						
i	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		人工バリア全体の設計・施工仕様策定に関する調査
ii	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 ④緩衝材施工/初期性能の提示

## 第1章 参考文献

- [1] 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—NUMO2010年レポート 第6章 処分場の設計，建設・操業・閉鎖技術

## 第2章 再冠水過程を対象とした緩衝材の研究

### 2.1 基本方針

本研究は、緩衝材の施工品質が再冠水時の現象に及ぼす影響の整理、発生現象の定量的評価、および施工技術を調査、検討するものであり、平成 20 年度に試験計画を立案した。この試験計画に準じて平成 21 年度以降、理想的な系における小規模試験、単純な系における土槽試験、さらには複合的な系における工学規模土槽試験へと、長期性能評価上問題となる発生現象の影響を試験によって確認し、検討すべき現象を段階的に絞り込みながらスケールアップさせることを基本として試験を実施している（図 2.1-1 参照）。

このような試験規模の段階的なスケールアップは、複雑な現象の個別検討を可能にするだけでなく、各段階で確実な成果をもたらすものと考えられる。こうして得られる検討成果は、再冠水から長期性能評価の観点からの緩衝材の設計や品質、及び搬送・定置技術への提言（施工方法の選択に資する情報などの工学技術）へ反映させる。ただし、検討段階で複合的な現象に対して詳細な検討が必要になった場合には、試験規模をスケールダウンして単一現象について詳細な検討を行う。

さらに、これらの成果は、その都度、不飽和浸透流解析へ反映させながら、最終的には複合的な系の工学規模土槽試験に適用し得る評価解析ツールへと高度化させることも可能である。不飽和浸透流解析成果は、実規模試験への適用、ひいては処分場の設計などに適用可能なものとなる。

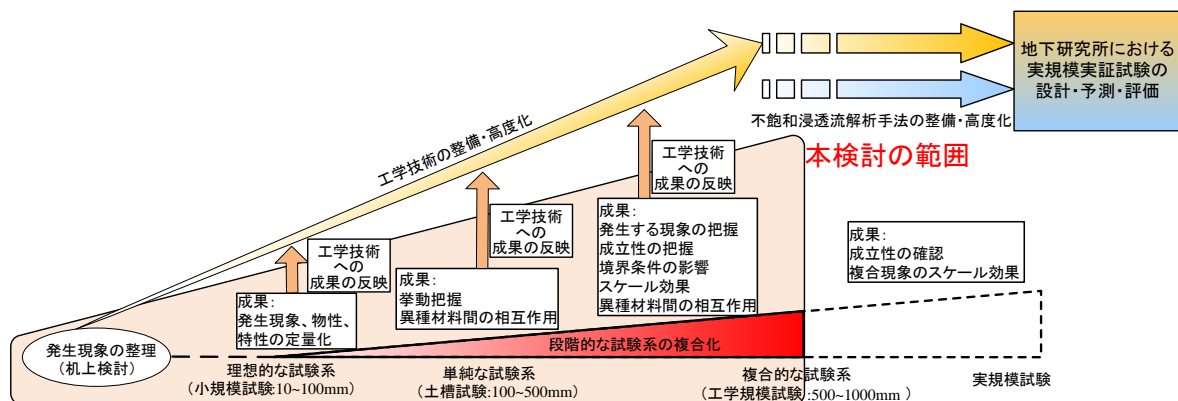


図 2.1-1 本研究の基本方針

平成 20 年度には、先ず、再冠水時に影響を及ぼす緩衝材の施工方法に関連する因子（影響因子）を抽出し、次に、この影響因子によって変動する緩衝材に発生する現象を整理した。

そして、抽出した施工方法の影響因子が、再冠水時の緩衝材に発生する現象に及ぼす影響を実験的に定量評価することによって、緩衝材の長期性能の観点から施工方法の影響因子の許容範囲を示すことが可能となる試験計画を立案した。

さらに本研究を通じて、緩衝材の設計や品質、および搬送・定置技術への提言をより積極的に行うために、緩衝材の施工方法及び緩衝材の性能変化に対する工学的対策に関して検討を行うこ

とした。

このような緩衝材の施工方法及び工学的対策を考慮に入れた検討成果は、解析による検討を経て、再冠水時の緩衝材に発生する現象の不確実性や建設・操業から長期性能評価までの緩衝材に関わる性能について、連続的な説明をすることにも役立つものと考えられる。

## 2.2 研究経緯

緩衝材の設計仕様から導かれる性能は、建設操業後の再冠水中に緩衝材の性能が変動しても長期性能を満足するものでなければならない。これらの再冠水中に緩衝材の乾燥密度や厚さが想定以上に変動しなければ長期性能を満足すると考えられる。

平成 20 年度から平成 24 年度では、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、0.5MNaCl 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（透水係数の増加）する可能性があり、塩水環境下では水みちが残る（透水係数の増加）可能性があることを示している。

平成 25 年度からは、緩衝材が、地下環境において受ける影響を検討するために、より現実的な処分環境（スケール効果、湧水量や水質等）を考慮した室内試験を行うとともに、幌延深地層研究センターを活用した原位置試験を行っている。これにより室内試験結果の地下環境への反映と、原位置試験からこれまで考慮していなかった試験条件等を抽出し、再冠水過程における緩衝材の流出の評価に反映する計画である。また、緩衝材の性能劣化事象として懸念される変質現象及び流出現象の影響に対する緩衝材の施工方法及び工学的対策についても検討を行う。緩衝材の施工方法については、定置時、再冠水時の湧水環境を考慮した方法を提示することを目標とする。一方、工学的対策には流出現象の原因となる過度な動水勾配を速やかに解消する方法（早期埋戻し）や流出する緩衝材の許容値の増強（緩衝材の高密度化）などが挙げられる。

## 2.3 再冠水時に発生する現象の整理

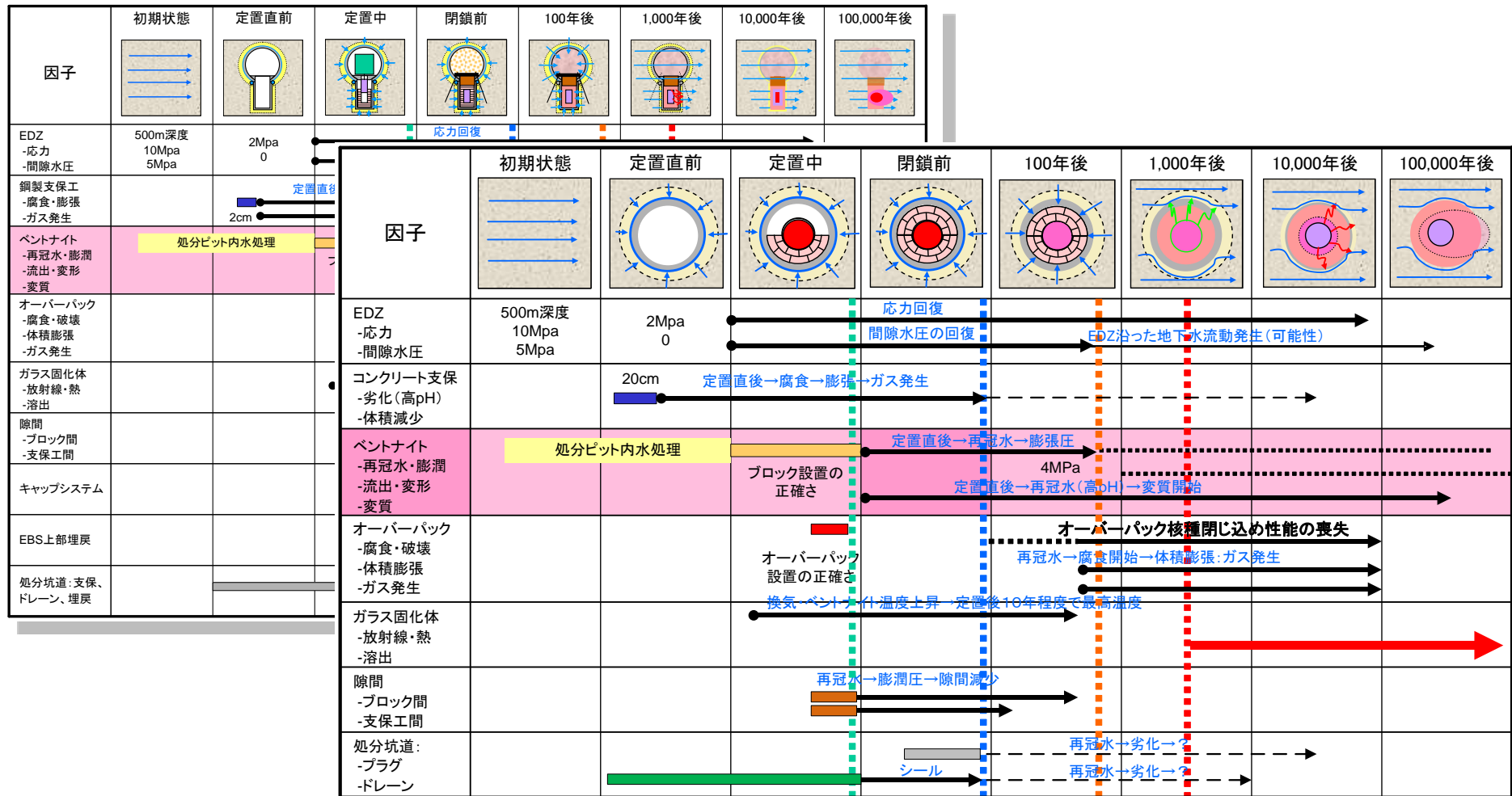
### 2.3.1 再冠水時に発生する現象の整理方法

建設・操業から再冠水後の数万年間という長期間の中でも、施設の閉鎖から再冠水終了までの間は、緩衝材にとって、様々な現象が急速に変化する期間である。建設・操業時には、人工バリアの施工による外的要因としての力学的作用と、岩盤からの地下水流入による水理学的作用が主であるといえる。この再冠水時における発生現象の整理を行い、建設・操業時から再冠水後の状態への場の変化の評価が実施できれば、説明性の高い処分概念を説明することが可能となる。そのためには、緩衝材の施工時の品質によって影響を受ける再冠水時に発生する現象のうち、緩衝材の性能に特に影響が大きいと考えられる現象を抽出する必要がある。そこで本研究では、平成

20年に、図 2.3-1 に示すように、既往の研究[1]などを参考に、再冠水時の緩衝材に発生する現象を抽出した。さらに、下記に示す既往の FEP（地層処分システムに影響を及ぼすと考えられるシステムの特質（**F**eature）、そこで発生する事象（**E**vent）や過程（**P**rocess））に関する調査を行い、FEPリストに基づき整理した再冠水時に緩衝材に発生する現象との対比によってその網羅性を確認した。

これらの妥当性は、既往の研究「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－」[1]、下記の文献、及び先行機関（SKB 社）調査で確認した。

- ・ 地層処分研究開発第 2 次取りまとめにおける FEP
- ・ 第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめにおける FEP
- ・ スウェーデンの FEP[2],[3]
- ・ フィンランドの FEP[4]
- ・ ベルギー、フランスにおける知見
- ・ スウェーデンの HLW 地層処分の実施主体である SKB からのヒアリング



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—(2/2)より抜粋

図 2.3-1 再冠水時に発生する現象の整理のイメージ（高レベル放射性廃棄物地層処分縦置き、横置き）[1]

### 2.3.2 緩衝材性能に影響を与える主な再冠水時の挙動

緩衝材の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、施工時における緩衝材の乾燥密度を検討する。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、地下水の流量によっては、緩衝材が処分孔外に流出するため低下するというように、再冠水時に緩衝材の性能に関しての重要な指標となりうるためである。

平成 20 年度は、文献調査などによって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影響を受け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。

これらの影響因子から、再冠水時に緩衝材の乾燥密度に影響を与える現象として、

- ・ 地下水浸潤挙動（熱影響、ガスによる影響を含む）
- ・ 化学変質
- ・ 緩衝材流出

を抽出し、研究を実施した。これらの妥当性は、2.1 で示した FEP により確認されている。

再冠水時には熱・水理・力学・化学（THMC）の影響割合が変化しながら定常状態へと至る。その過程において本研究で計画している試験によって、乾燥密度に影響する現象は水理、力学が中心である。また時系列的には、再冠水初期には力学関係の現象、さらに再冠水が進むにつれて水理・化学関係の現象に着目する[1]。

本研究では、試験規模をスケールアップさせることによって着実な成果を得ることを基本方針としており、現象毎に単独現象を室内小規模試験レベルで評価した後に、複合的な現象として工学規模試験を行う計画である。

表 2.3.2-1 に本年度実施した試験項目と試験規模の関係を示す。



表 2.3.2-1 調査項目と試験規模の関係

再冠水時に考慮すべき緩衝材の挙動	小規模試験	土槽試験	工学規模試験 (複合問題)
地下水浸潤	(a): 不飽和浸潤速度	—	—
	(b): 施工品質（密度分布）の均質化	(c): 施工品質（密度分布）が再冠水に及ぼす影響 (d): 異種材料界面を有する緩衝材の浸潤状況	—
	(e): 再冠水時の間隙空気の影響		
緩衝材の化学変質	(f): 緩衝材のイオン交換反応	—	—
緩衝材の流出	(g): 緩衝材表面近傍の止水性能評価	—	(h): 幌延地下施設における緩衝材流出試験

上記の検討に加え、本研究では、緩衝材の性能変化に対する工学的対策の考え方の提示を行う。ここでいう工学的対策は、処分孔周辺の性質（湧水量、地下水のイオン濃度等）に対して、緩衝材近傍の部材（グラウト等）により、緩衝材の性能劣化現象を抑制する対策を指す。例えば、湧水による緩衝材への影響に着目し、処分孔周辺の地下水流量を解析的に求め、工学的な対策を想定してその効果を解析的に評価している。また、これまでの試験による現象のモデル化を検討し、そのモデルを用いた再冠水時の現象を解析的に再現することにより、再冠水後の状態（長期挙動評価の初期状態）を示す方法について検討している。さらに、緩衝材の性能についての情報を整理し、来年度のとりまとめに向けた性能の評価方法について検討する。

## 第2章 参考文献

- [1] (財)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) ー遠隔操作技術高度化開発ー (2008).
- [2] SKB : Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can, SKB TR-06-18 (2006).
- [3] SKB : FEP report for the safety assessment SR-Can, SKB TR-06-20 (2006).
- [4] Bill Miller and Nuria Marcos : Process Report -FEPs and Scenarios for a Spent Fuel Repository and Olkiluoto, POSIVA 2007-12 (2007)

# 第3章 緩衝材への地下水浸潤に関わる調査

## 3.1 緩衝材への地下水浸潤状況の評価

### 3.1.1 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、再冠水中の緩衝材内で化学変化が開始される時期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ける水と海水相当のイオン強度の NaCl 水溶液(0.5M)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。

#### (2) 既存の研究

同様の研究は、これまでも幾つかなされていた。鈴木ら[1]は、ベントナイト系人工バリア材料で作製した乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  の供試体（ $\phi 20\text{mm} \times h20\text{mm}$ ）を絶乾状態にした後に、純水に浸漬させ、供試体内の飽和度分布の経時変化を取得している。図 3.1.1-1 に示した浸潤フロントの経時変化から飽和に要する時間を算出すると、底面から 3mm の地点で 88.9hr、9mm の地点で 236.5hr となる。浸透速度は、図に示すように、時間に反比例しており、浸潤が進むほど浸潤速度は遅くなる傾向になる。

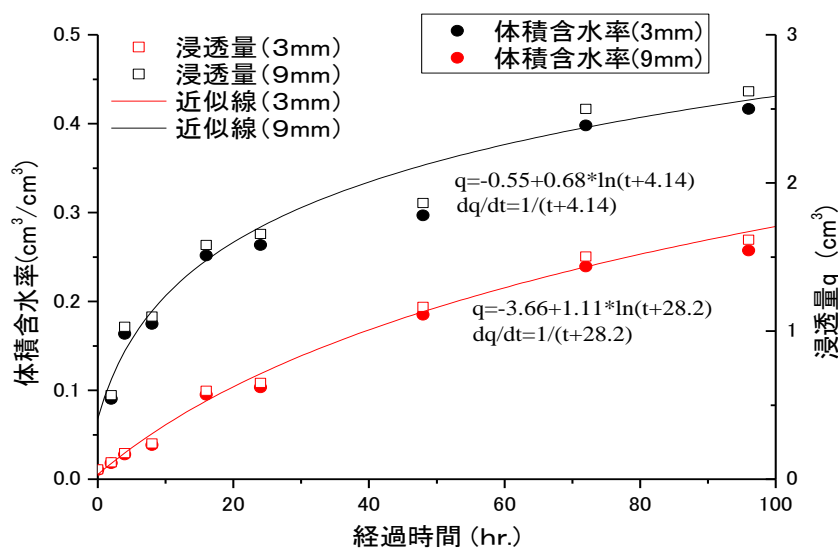


図 3.1.1-1 鈴木らの試験結果による浸潤フロントの経時変化[1]

### (3) 試験方法

使用した試験機を図 3.1.1-2 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。
- 供試体上端にはヒーターを配置し、必要に応じて熱勾配を与えることができる。
- 必要に応じて排水側もフローポンプによる圧力、流量制御が可能である。

平成 28 年度はさらに、後述する飽和フロントに対する通水圧の影響を評価するために、

- フローポンプによる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 3.1.1-1 に示す。

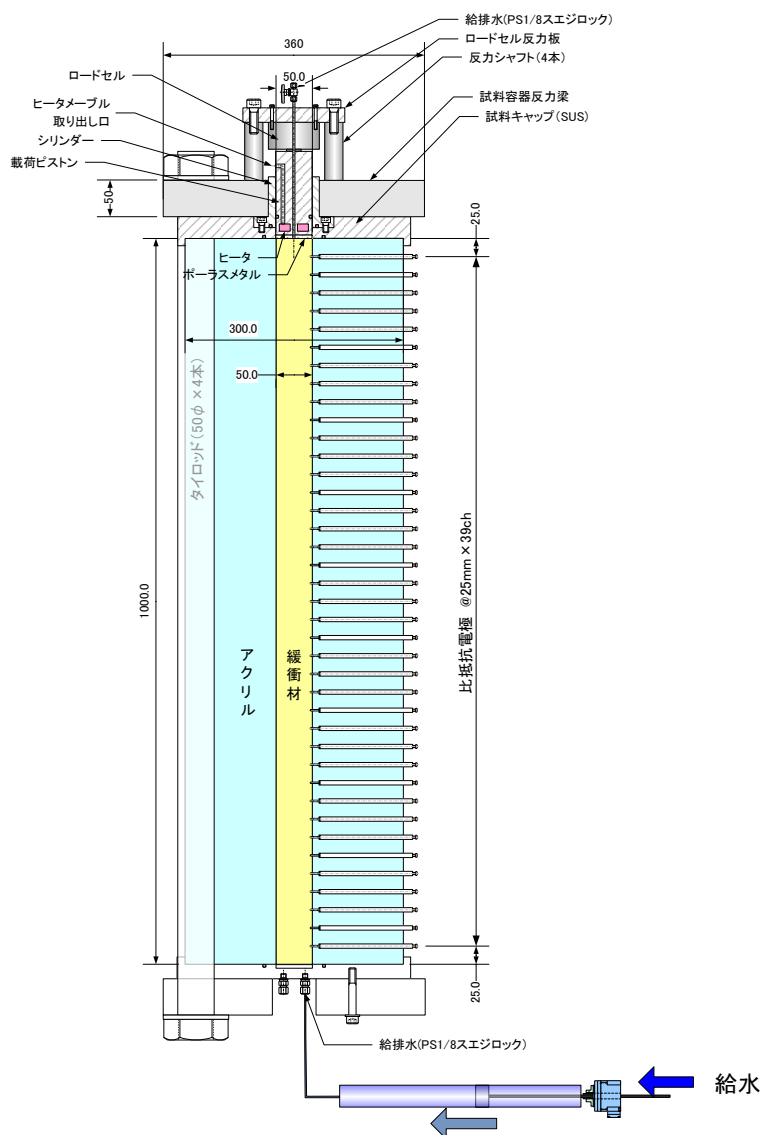


図 3.1.1-2 長尺ベントナイト供試体を用いた一次元浸潤速度取得試験

表 3.1.1-1 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 年度実施内容
1	1.6Mg/m <sup>3</sup> (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			塩水		

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 200 回繰り返して作製した [2]。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 (図 3.1.1-3) 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 3.1.1-4)。また、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 3.1.1-3 比抵抗測定用電極の設置



図 3.1.1-4 締固め終了後の試験器

#### (4) 試験結果

図 3.1.1-5 に浸潤途中の写真を示す。写真から分かるように、浸潤フロントの位置を目視で推定するのは困難であった。



図 3.1.1-5 液体の浸潤状況（左：蒸留水、右：NaCl 水溶液（0.5M））

約 6 年間に亘る比抵抗値による浸潤状況の計測結果を図 3.1.1-6 に示す。図の横軸は、比抵抗値を初期比抵抗値で無次元化して、比抵抗値の浸潤に伴う低下割合を示している。なお、1 カ所の比抵抗計測で 4 つの電極を使用するため、供試体の上下端 75mm 分は計測ができない。

図から、浸潤に伴って比抵抗が注水側から徐々に低下していることが分かる。また、蒸留水に比べ NaCl 水溶液の方が、給水圧が小さいにも拘らず浸透距離が大きく、更に比抵抗の低下割合が大きいことが分かる。しかしながら、どちらのケースも比抵抗が変化しているフロントは、給水時間 2200 日に対して 925mm(供試体の計測限界)程度である。925mm での比抵抗が低下し始めたのは給水開始から約 1600 日程度であった。このため、1600 日程度で浸潤フロントが最上部にまで達したものと判断した。ただし、蒸留水のケースと NaCl 水溶液のケースで給水圧が異なることに注意が必要である。

ここで、図 3.1.1-6 に示した比抵抗値の経時変化のうち幾つかについて[2]、飽和度と比抵抗の関係式[2]を用いて比抵抗値を飽和度に換算したものを図 3.1.1-7 に示す。図から、比抵抗値と飽和度の分布は概ね同様であるが、飽和度分布の方が蒸留水と NaCl 水溶液の違いが顕著である。これは、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、逆に、高飽和度領域では飽和度の変化に対して比抵抗の変化が鈍感であるためである。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、NaCl 水溶液の場合、遷移領域があまり形成されていないことが分かる。これは、NaCl 水溶液の場合、モンモリロナイトの膨潤度合が蒸留水の場合に比べて小さく、外間隙が十分に小さくならず、毛管力が相対的に小さいた

めであると考えられる。なお、NaCl 水溶液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、実際には、供試体作製時の間隙水と供給された 0.5M の NaCl 水溶液が混合しながら浸潤するため、比抵抗を求める式中の補正係数]が経時変化するためと考えられる。

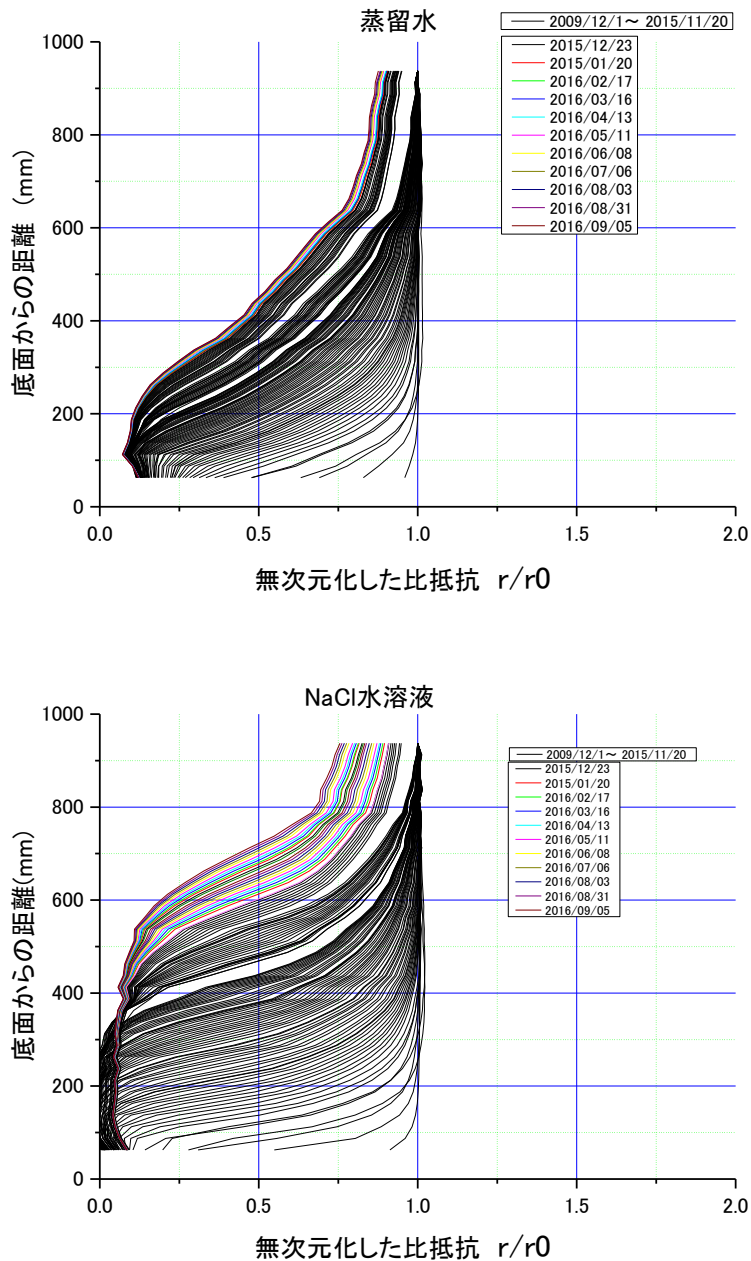


図 3.1.1-6 浸潤に伴う比抵抗の変化  
(上：蒸留水、下：NaCl 水溶液 (0.5M))

さらに、図 3.1.1-7 の NaCl 水溶液の場合では、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る。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。ただし、電極の腐食状況が、他の箇所よりも進行している可能性があるため、今後、試験を解体する際に、実際の飽和度分布と計測値の整合性を確認する予定である。

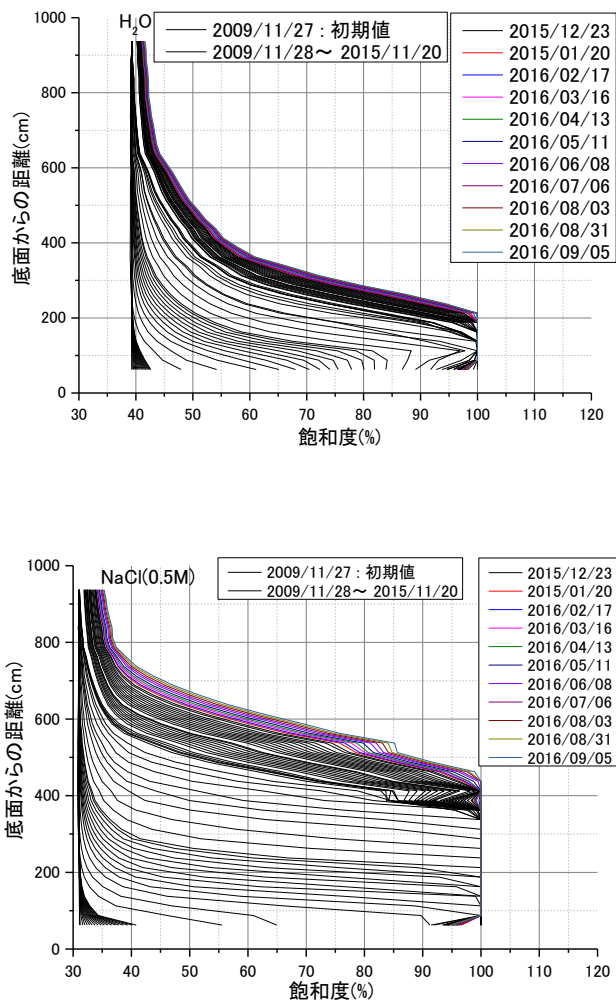


図 3.1.1-7 浸潤に伴う飽和度の変化  
(上：蒸留水、下：NaCl 水溶液 (0.5M))

図 3.1.1-8 には、給水圧を増加させた後の供試体の給水側を示す。現段階では、明確な変化を目視観察することは難しい状況である。





図 3.1.1-8 加圧後の浸潤状況（左：蒸留水、右：NaCl 水溶液（0.5M））

図 3.1.1-9 には、図 3.1.1-7 に示した飽和度分布において、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ことに注意が必要である。

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  $d = 60t^{0.35}$  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 3.1.1-9 の破線)、

$$d = ct^{0.5} \quad (\text{式 3-1})$$

よりも緩慢である。ここに、 $c$  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。

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、NaCl

水溶液の場合、浸潤フロントの位置  $d(\text{mm})$  と給水時間  $t(\text{day})$  の関係は  $d=14t^{0.5}$  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い。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まだ観測されていない。

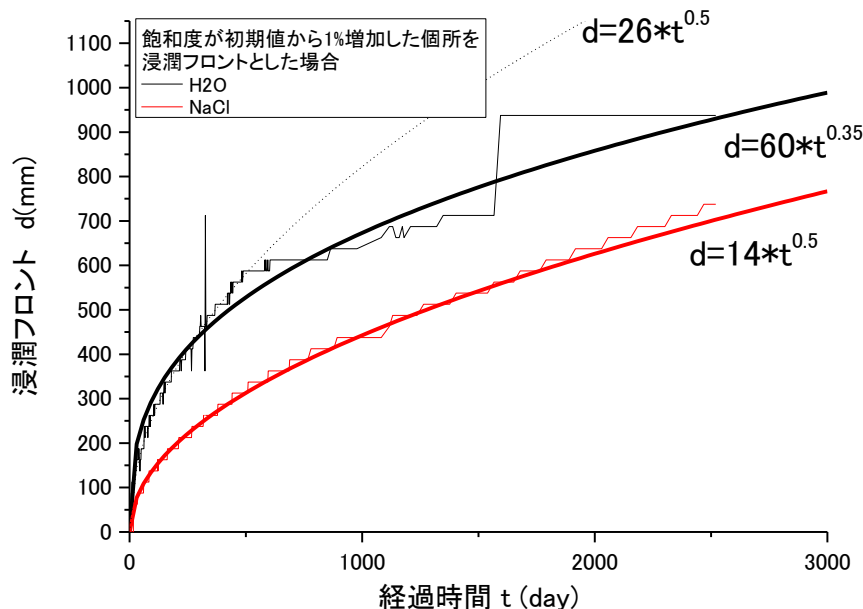


図 3.1.1-9 浸潤フロントの進展状況（初期飽和度からの増分が1%で定義）

次に、飽和度が95%以上となる場所を飽和フロントと定義して、その進展状況をまとめると図3.1.1-10のようになる。図から、飽和フロントの進展状況は、蒸留水の場合に比べNaCl水溶液の場合の方が速いことが分かる。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、NaCl水溶液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、NaCl水溶液の場合、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まだ観測されていない。ただし、今後、計測を続けることで飽和フロントの推移に変化が生じる可能性がある。

なお、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近似式から計算すると、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めである。

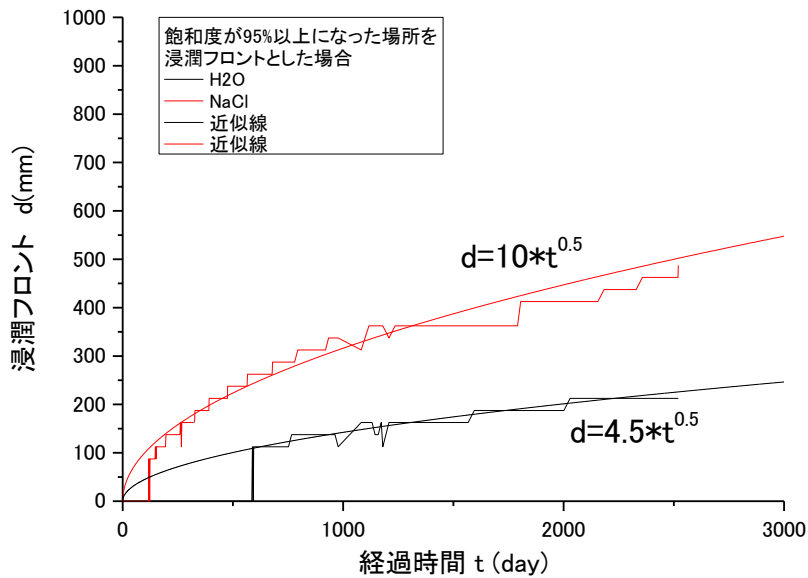


図 3.1.1-10 飽和フロントの進展状況（飽和度 95%以上で定義）

図 3.1.1-11 には、図 3.1.1-9 と図 3.1.1-10 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。

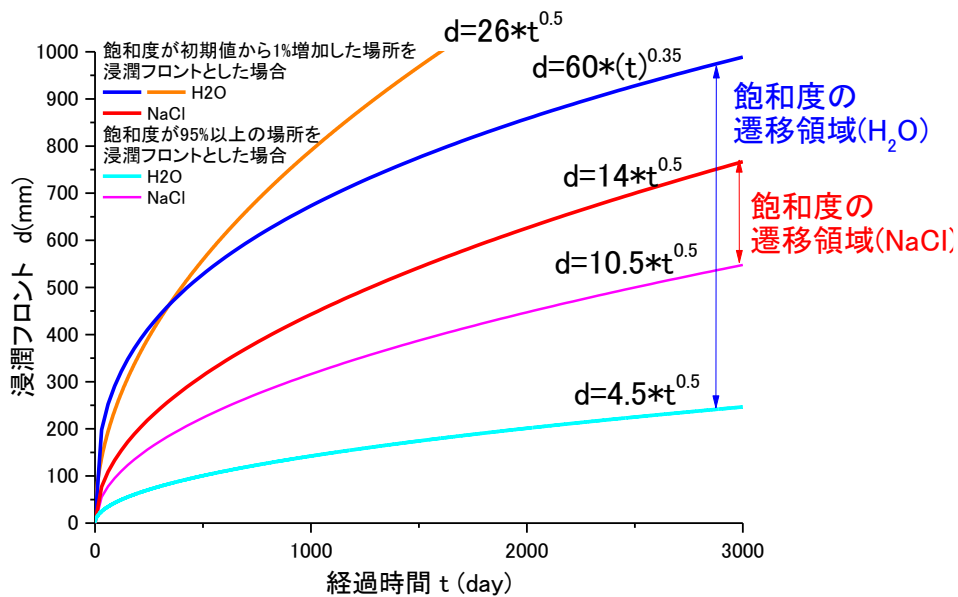


図 3.1.1-11 飽和度の遷移領域

図 3.1.1-12 には、給水量を間隙面積で除して算出した注水距離を示している。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 3.1.1-11 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 3.1.1-12 と図 3.1.1-11 では浸潤フロントの距離が異なるが、これは図 3.1.1-11 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 3.1.1-12 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。実際の飽和領域は図 3.1.1-12 の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 NaCl 水溶液のケースで到達距離が急激に増加している。また、蒸留水のケースについても到達距離が増加している。

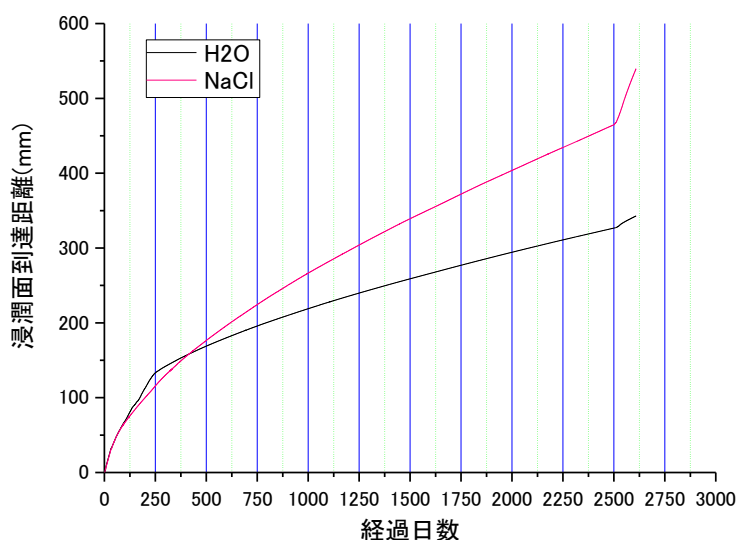


図 3.1.1-12 液体の浸潤状況

図 3.1.1-13 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 3.1.1-13 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 3.1.1-14 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、NaCl 水溶液の場合、通水初期からずっと通水圧が負値のままであることが分かる。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、NaCl 水溶液の場合、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様子は見られない。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 NaCl 水溶液の方が大きい。

さらに、図 3.1.1-13 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、NaCl 水溶液のケースの場合、飽和状態になりつつあることが分かる。

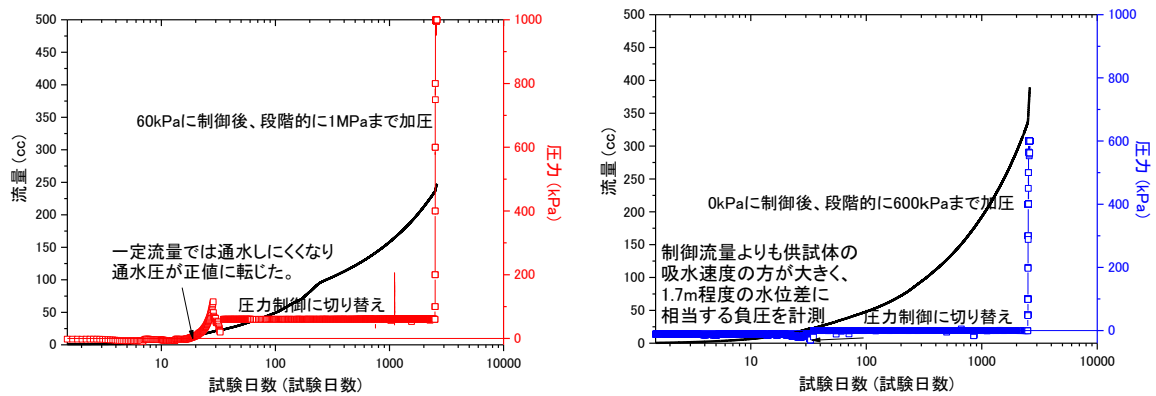


図 3.1.1-13 液体の浸潤状況 (左：蒸留水、右：NaCl 水溶液 (0.5M))

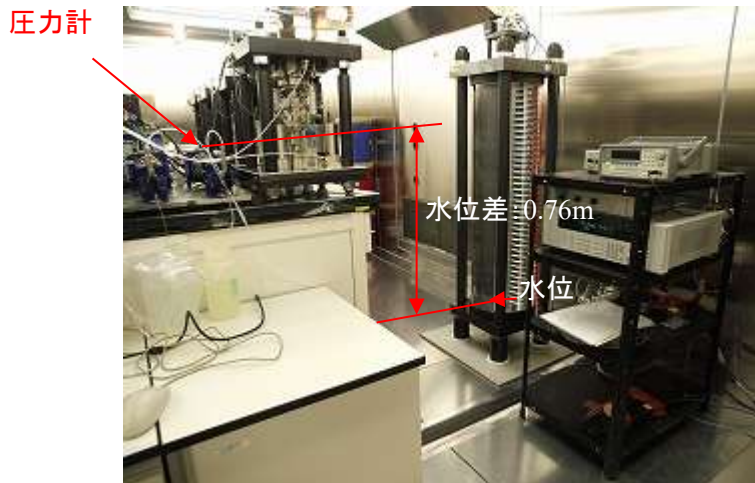


図 3.1.1-14 圧力計と浸潤面の水位差

図 3.1.1-15 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、NaCl 水溶液で 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、NaCl 水溶液の軸応力は定常状態となっている。



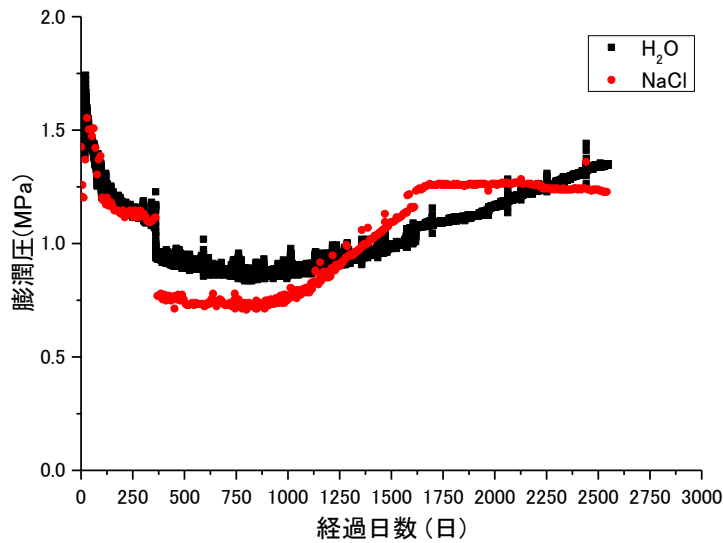


図 3.1.1-15 軸応力の経時変化

### 3.1.2 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（膨潤変形条件）

#### (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なども取得する。

#### (2) 試験方法

表 3.1.2-1 に試験ケースを示す。試験では、図 3.1.2-1 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。

表 3.1.2-1 長尺ベントナイトの不飽和浸潤速度取得試験ケース一覧

条件	状態	液種	供試体	給水量	試験数	計測項目
膨潤変形条件	新規	H <sub>2</sub> 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 <sup>3</sup> 程度	水位一定	1	比抵抗計測 定点撮影

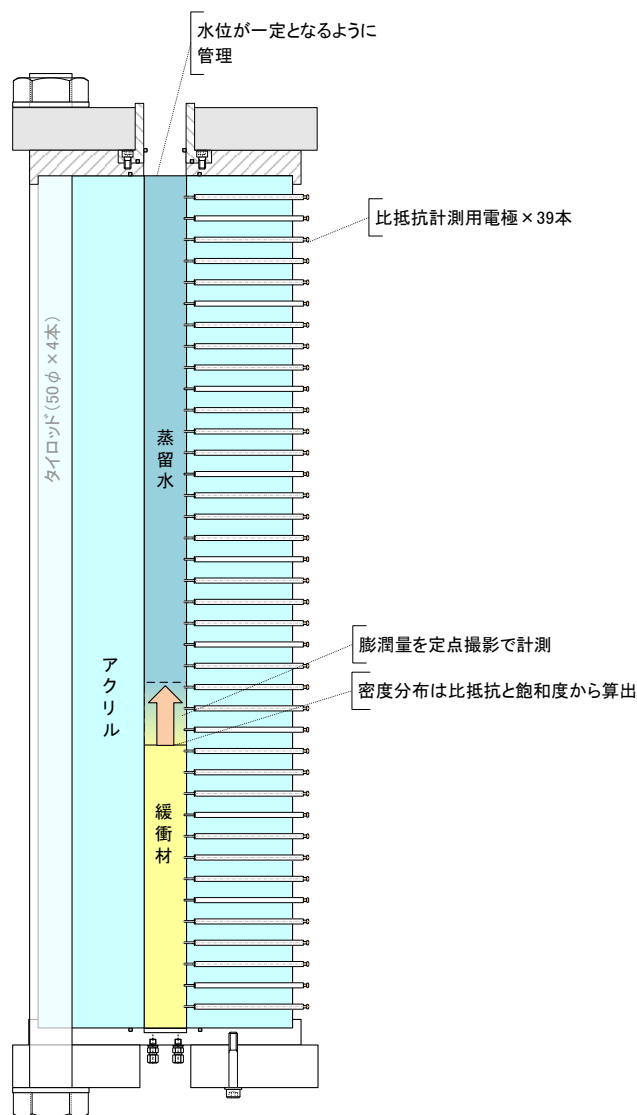


図 3.1.2-1 一次元浸潤速度試験セル（膨潤変形条件）

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。水位はマリオット管で一定となるようにした[2]。

また、注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を目視で計測することとした[2]。

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。

### (3) 試験結果

図 3.1.2-2 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のが分かる。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。図 3.1.2-3 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膨潤しておらず、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ることが分かる。

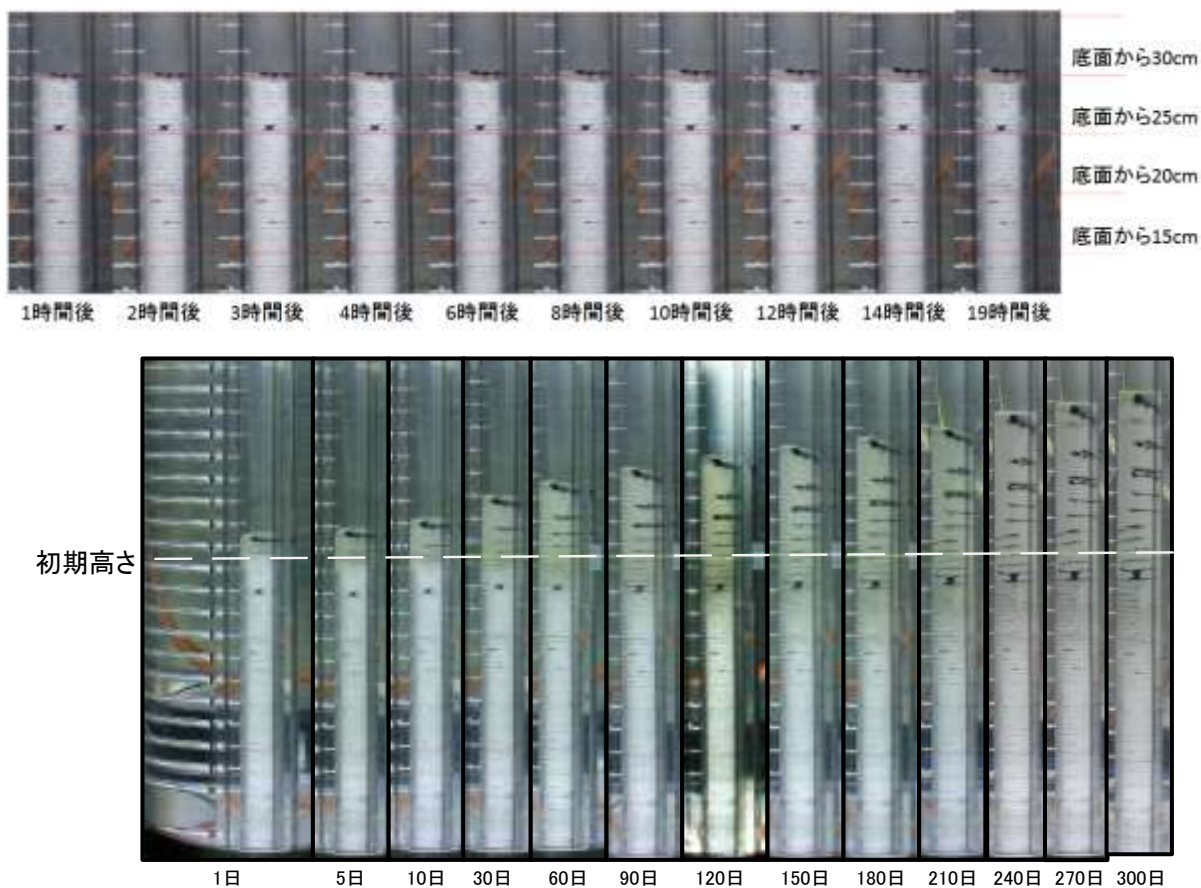


図 3.1.2-2 膨潤試験状況



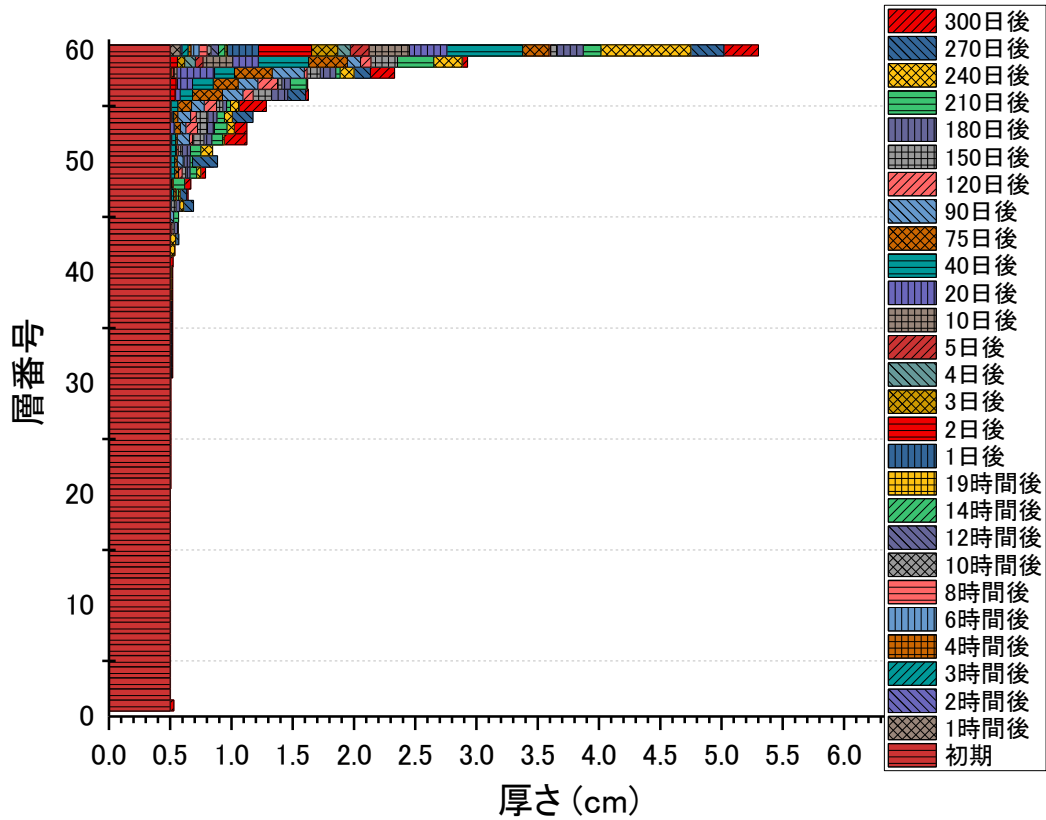


図 3.1.2-3 層ごとの厚さの変化

図 3.1.2-4 には目視観察から得られた密度分布を示す。さらに、図 3.1.2-5 には、図 3.1.2-4 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を低下させている状況が分かる。

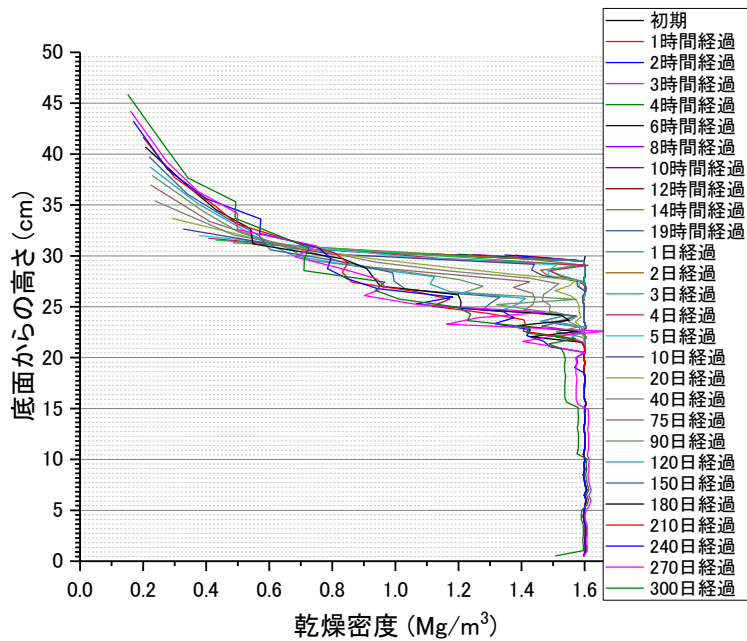


図 3.1.2-4 供試体密度分布

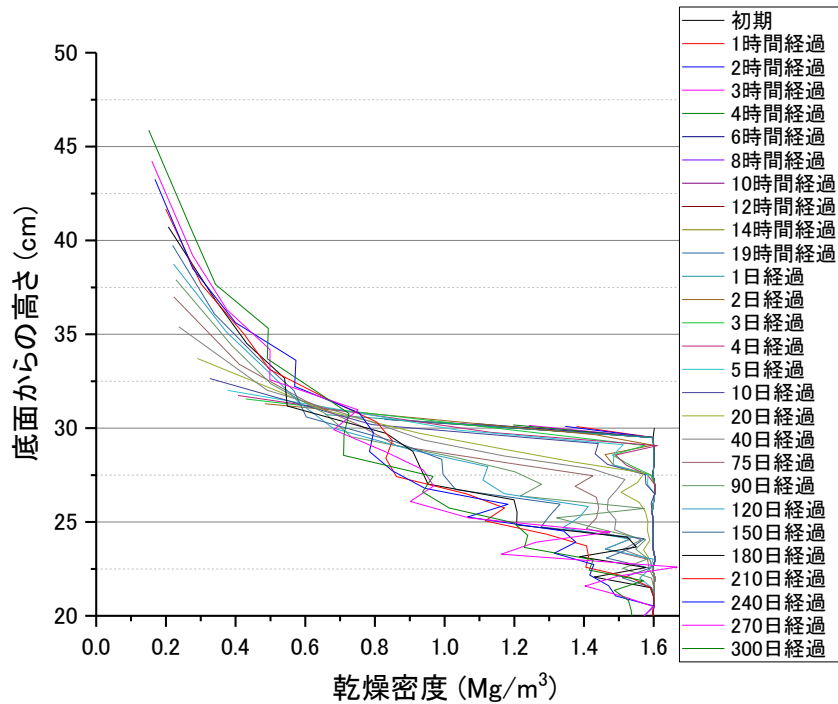


図 3.1.2-5 供試体密度分布 (拡大図)

図 3.1.2-6 には、比抵抗値の分布を示す。図 3.1.2-2 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が拡散してそ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 3.1.2-7 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）。210 日目の供試体表面は、供試体底面から 416.8mm 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 400mm に位置している。ただし、400mm 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、375mm から 37.5mm 下りの 337.5mm を 210 日の段階では 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、この比抵抗値のばらつきは、供試体上面近傍の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。

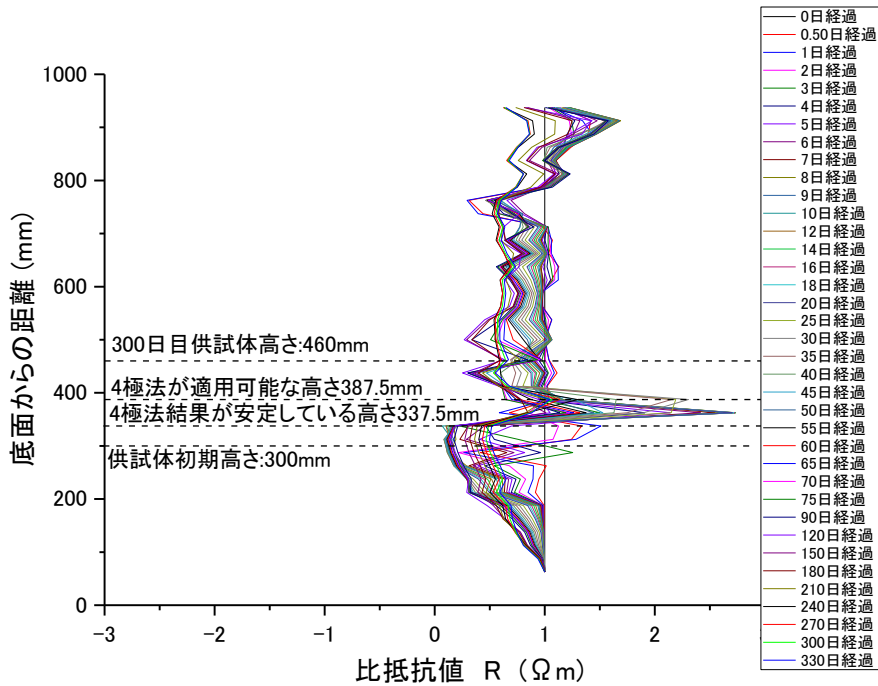


図 3.1.2-6 比抵抗値から算出した飽和度分布

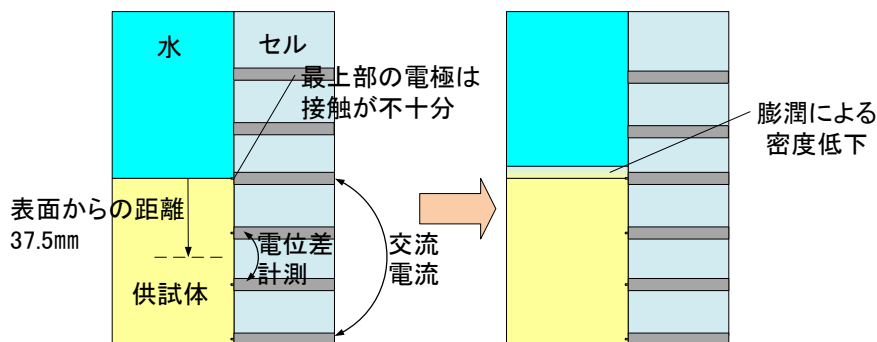


図 3.1.2-7 供試体上面の状況

ここで、図 3.1.2-7 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 3.1.1-11 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、一概に比較はできないことに注意が必要である。目視観察結果から得られた浸潤距離は、20 日目以降は一定であり、その後は膨潤厚さのみが増加傾向である。このことから、20 日以

降は浸潤領域で膨潤変形のみが進み、供試体内部にはあまり水が供給されていないことが考えられる。この傾向は、距離の大きさの違いはあるものの、比抵抗計測結果でも同様であった。

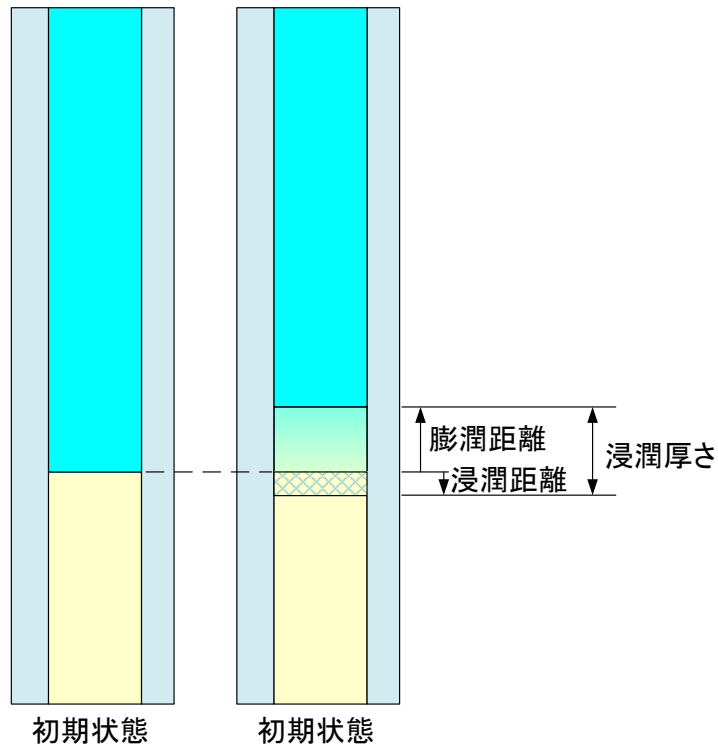


図 3.1.2-8 試験開始前後の供試体上面の状況

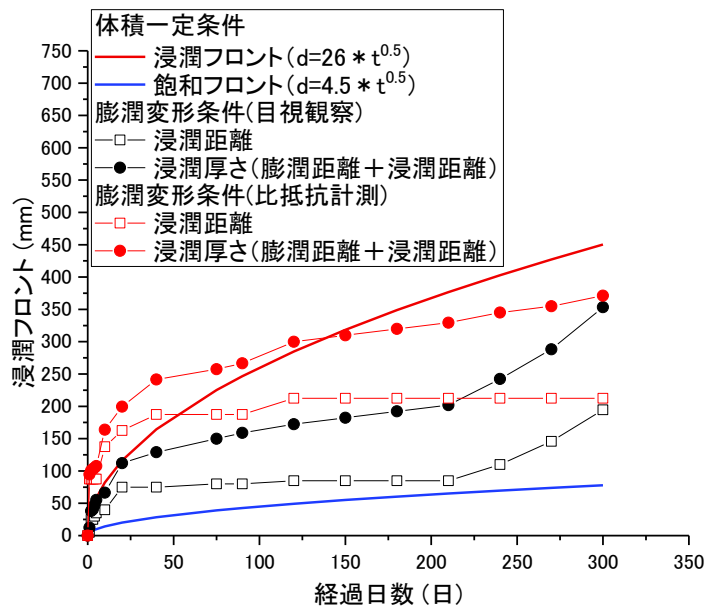


図 3.1.2-9 供試体密度分布

## 3.2 施工品質（密度差）が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響の調査

### 3.2.1 研究の背景と目的

これまで、処分施設における緩衝材は、建設操業技術と長期性能検討は個別になされてきた。これは建設操業技術と長期性能検討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に併せて、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、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ていたことが考えられる。このため、長期性能評価では施工方法特有の密度分布は反映されずに、均一な乾燥密度を想定していた実施されていた。

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。

### 3.2.2 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 3.2.2-1 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。試験機を準備するに当たり、留意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。
- ▶ 注水はシリンジポンプ（フローポンプ）によって行い、排水は集水瓶で集めイオン分析する。
- ▶ 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 3.2.2-1 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 3.2.2-2 参照）。

試験ケースを表 3.2.2-1 に示す。試験水として 0.5M の NaCl 水溶液を使用したケース 1s~3s も実施した。また、作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とした。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す。力学理論に照らせば、この傾向は膨潤圧が釣合うまで生じるはずである。よって本試験では、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ことになる。

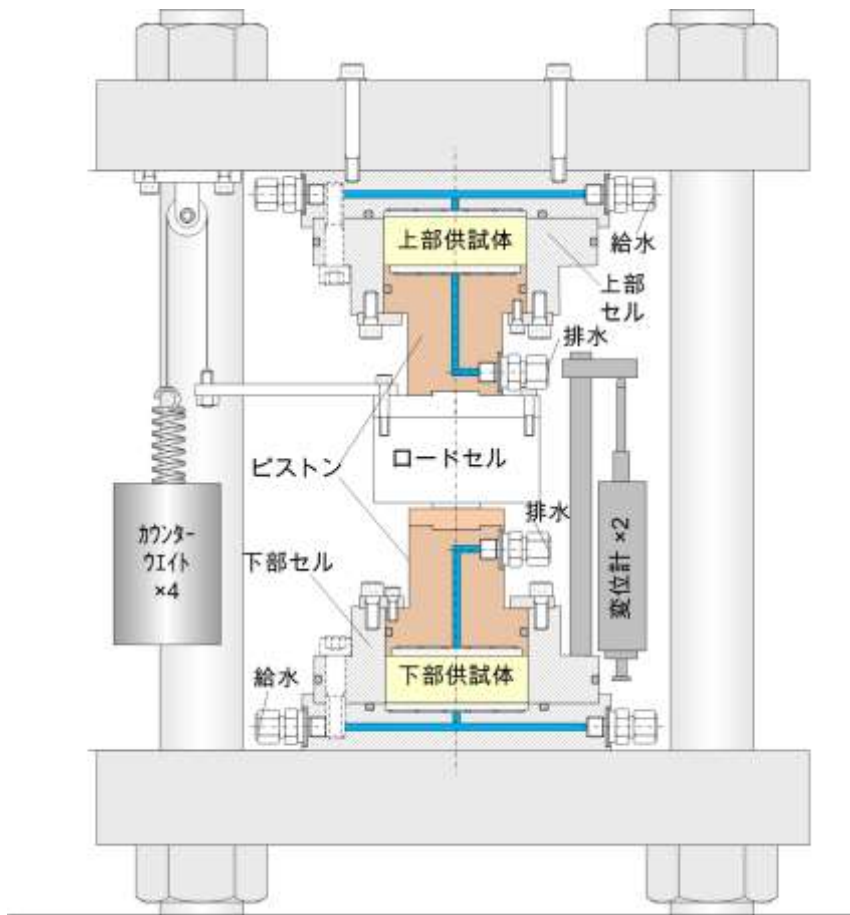


図 3.2.2-1 力学物性（膨潤量）による均質化の判断のイメージ

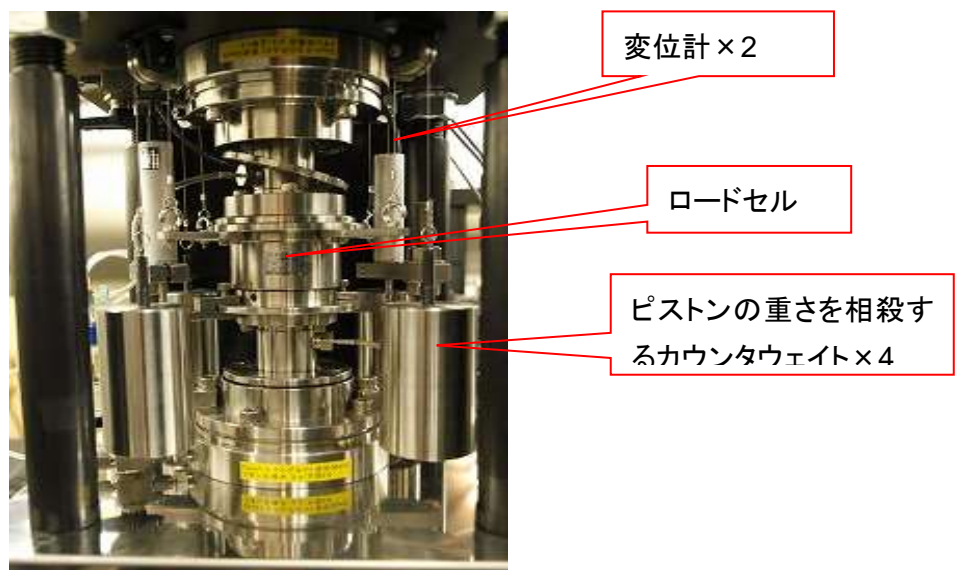


図 3.2.2-2 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験機

表 3.2.2-1 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 <sup>3</sup> )	低乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	有効ベントナイト 乾燥密度(Mg/m <sup>3</sup> )		初期含水比 (%)		膨潤 方向	平均乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	液種	備考
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	解体
2	1.984 (2.0)	1.190 (1.2)	1.792	0.963	13.41	46.74				実施済み
3	1.698(1.7)	1.493(1.5)	1.473	1.258	19.81	27.35				解体
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)	NaCl 水溶液  0.5M	継続中
2s	1.991 (2.0)	1.187 (1.2)	1.801	0.960	13.54	47.96				継続中
3s	1.747(1.7)	1.550(1.5)	1.526	1.317	18.57	25.55				継続中

( )は計画値

## (2) 試験結果 (蒸留水ケース)

### 1) 膨潤量

試験結果を図 3.2.2-3～図 3.2.2-6 に示す。試験結果は、比較のために既に終了している Case2 も示している。図 3.2.2-3 に膨潤量の経時変化を示す。図には Case1 (高密度供試体 (乾燥密度 1.8Mg/m<sup>3</sup>)、低密度供試体 (乾燥密度 1.4Mg/m<sup>3</sup>)) と Case2 (高密度供試体 (乾燥密度 2.0Mg/m<sup>3</sup>)、低密度供試体 (乾燥密度 1.2Mg/m<sup>3</sup>))、さらに Case3 (高密度供試体 (乾燥密度 1.7Mg/m<sup>3</sup>)、低密度供試体 (乾燥密度 1.5Mg/m<sup>3</sup>)) の乾燥密度の経時変化を併せて示している。なお、ここで膨潤量は、下側の高密度供試体が上向に膨潤する場合を正として取りまとめている。

Case2 の膨潤変形は、当初フローポンプで流量制御で飽和させたため、試験開始から早い段階で定常状態に至っているのに対して、Case1 と Case3 では、フローポンプを使用せずに圧力制御で給水しているため、膨潤挙動が緩慢であり、Case1 では約 2000 日以上経過した現在でも、まだ定常に達しておらず、未だに少しずつ変形が継続している。Case3 も同様に緩慢ではあるが、変形が継続しているものの、概ね定常に達したと見做しても良い程度の変形である。Case2 では、変形は 100 日程度でほぼ定常になりそれ以降一定である。

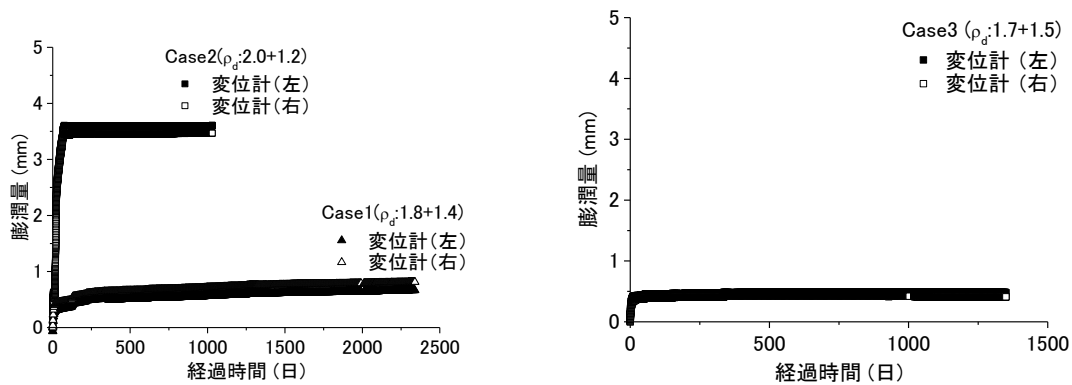


図 3.2.2-3 膨潤量の経時変化

図 3.2.2-4 には、Case1 では加圧タンクによる圧力制御通水圧と膨潤圧の経時変化を、Case2 と Case3 にはフローポンプの通水圧と膨潤圧の経時変化をそれぞれ示している。図 3.2.2-4 に示すように、Case1 の場合、圧力制御で給水しているため、給水圧の経時変化が滑らかであるのに対して、Case2 の場合は、試験当初、破過による過流量を防ぐためにフローポンプによる流量制御で給水を行ったため、上下の供試体の通水圧に相違が発生した。このため、一旦給水を止めて上下に同じ給水圧となるようにフローポンプによる圧力制御で給水を行った。このような段取り替えのため、試験初期段階で大きな給水圧の増減があるが、その後の試験状況に影響は及んでいないものと考えられる。なお、給水圧の小刻みな振幅は、フローポンプの盛替えによるものである。Case3 では、フローポンプの通水圧を 0.01MPa 程度にして膨潤圧に有意な影響が及ばないように配慮した。膨潤圧に関しては Case1 では 0.66MPa、Case2 では 0.45MPa であった。

膨潤量の観点から平衡状態を判断すると、Case1 と Case3 に関しては、未だ平衡状態ではないものと考えられる。なお、本試験における膨潤圧を計測するロードセルは両供試体の間に設置しており、計測される膨潤圧は釣り合うまでは常に低乾燥密度の膨潤圧を計測することになることに注意すべきである。このため、低乾燥密度供試体の中で最も密度が高い Case3 の膨潤圧が増加傾向であり、Case1 の膨潤圧が低下傾向である。現段階では、Case1 よりも Case3 の膨潤圧の方が大きいため、Case1 から Case3 の膨潤圧の大きさは、低乾燥密度供試体の密度の順番と整合している。この実験事実は、緩衝材のバルクの膨潤圧は低乾燥密度領域によって決定し、低乾燥密度領域が膨潤によって解消されるに従って増加することを示唆している。このことは、緩衝材の膨出対策で見込むべき膨潤圧などの推定にも役立つものと考えられる。



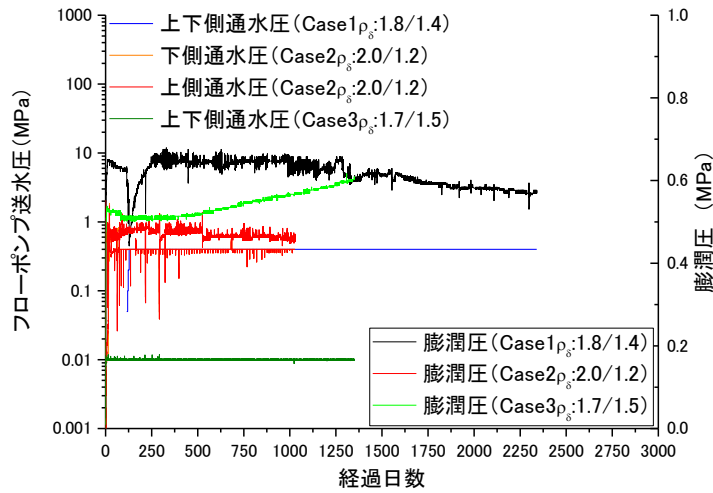


図 3.2.2-4 フローポンプによる通水圧の経時変化

図 3.2.2-5 には、Case1 と Case3 のローポンプによる制御流量の経時変化を示している。Case1 では、001cc/min の流速で注水を行い、膨潤量がほぼ定常になった時点で流速を 0.0005cc/min に低下させた。この際に通水圧が水圧計の計測範囲の上限値である 2MPa に近づいたため、流速を 0.0002cc/min にして試験を継続している。なお、試験開始後 18 日目に通水が一時的に止まっているが、これは停電によるものである。停電復旧後速やかに試験を開始し、停電の前後で挙動に大きな差異が無いことを確認した上で試験を継続している。この点に関しては他の試験においても同様である。Case3 では、前述のように計測される膨潤圧に通水圧が有意な影響を及ぼさないようにするために、フローポンプの通水圧を 0.01MPa に制御したため、通水量が 0.00001cc/min 程度となっている。

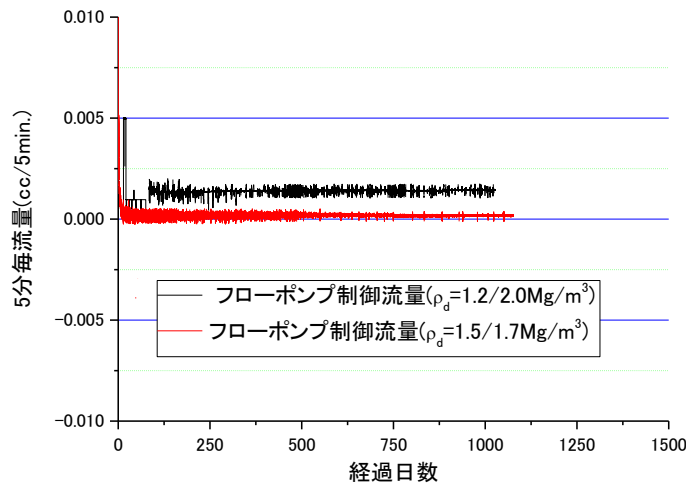


図 3.2.2-5 フローポンプによる制御流量の経時変化

図 3.2.2-6 には、Case1、Case2、Case3 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している。図から、どちらのケースも下部にある高密度供試体の膨潤圧が上部に

ある低密度供試体の乾燥密度よりも膨潤圧が大きいため、高密度供試体は膨潤しながら密度が下がり、低密度供試体は圧縮されながら密度が増加している。

Case1 に関しては、試験開始からしばらくの間、排水が得られなかったことから、通水圧が相殺するように上下の両供試体にそれぞれ 0.2MPa の通水圧を作用させて飽和を促進させた。その結果、排水が確認された。高密度供試体は  $1.8 \rightarrow 1.74 \text{Mg/m}^3$  へと減少し、その後定常化した。低密度供試体は  $1.4 \rightarrow 1.45 \text{Mg/m}^3$  へと増加し、その後定常化した状況が継続している。今後、試験を継続することで、定常に至る過程でさらに密度差は低減するものと考えられるが、均一化には至らないものと予想される。

Case2 に関しては、高密度の供試体が  $2.0 \rightarrow 1.69 \text{Mg/m}^3$  へ減少し、その後定常化し、低密度の供試体は  $1.2 \rightarrow 1.45 \text{Mg/m}^3$  へと増加し、その後、平成 23 年度ではほぼ定常になり、有意な密度差が残る結果となった。この密度差は、後述する土質力学（弾塑性力学）に立脚した理論的な説明も可能であることから、試験は平成 23 年度で終了し、平成 24 年度には後述する供試体内部の密度分布、含水比などの諸量を取得した。

Case3 に関しては、高密度の供試体が  $1.7 \rightarrow 1.66 \text{Mg/m}^3$  へ減少し、その後定常化し、低密度の供試体は  $1.5 \rightarrow 1.53 \text{Mg/m}^3$  へと増加し、その後、平成 23 年度ではほぼ定常になり、有意な密度差が残る結果となった。

膨潤圧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、この膨潤圧の経時変化は両供試体の乾燥密度が  $1.6 \text{Mg/m}^3$  になった時点で平衡状態に達するはずである。しかしながら力学的には、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 3.2.2-6 に示したように、高密度供試体と低密度供試体の密度変化は互いに近づくが、密度差はゼロにはならないと考えられる。

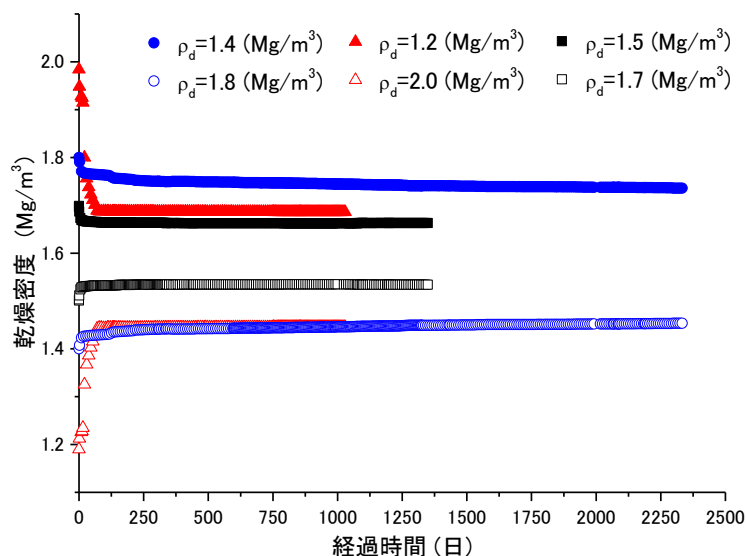


図 3.2.2-6 膨潤に伴う乾燥密度の経時変化

## 2) 供試体解体結果

### a 乾燥密度 $1.4\text{Mg}/\text{m}^3$ - $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$ ケース

乾燥密度  $1.4\text{Mg}/\text{m}^3$  -  $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$  ケースを、乾燥密度  $1.2\text{Mg}/\text{m}^3$  -  $2.0\text{Mg}/\text{m}^3$  のケースと同様に供試体を解体した。供試体の解体に際しては、図 3.2.2-7 に示すような超音波カッターを用いた供試体スライサーを新たに適用した。



図 3.2.2-7 供試体スライサー

表 3.2.2-2 に乾燥密度が  $1.4\text{Mg}/\text{m}^3$  と  $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$  を直列させたケースの解体結果を示す。低密度供試体と高密度供試体のどちらもほぼ飽和した状態であることが分かる。図 3.2.2-8 には、膨潤量から算出した平均乾燥密度とスライスした各試料の乾燥密度を併せて示している。図から、膨潤量から算出した平均乾燥密度と解体結果は概ね整合する結果となった。両供試体共に十分に飽和しているのにも拘らず密度分布が明確に残っていることから、緩衝材の施工時に密度分布が発生すると膨潤後でもある程度の密度分布が残留するものと考えられる。

図 3.2.2-9 には、解体時の密度分布と供試体作製時と解体直前の平均乾燥密度を併せて示す。図から、供試体内部には密度分布があり、両供試体の上下端面で密度低下が激しいことが分かる。この乾燥密度の低下が直列膨潤量試験中に発生したものか、解体時に発生したものかは不明であるが、供試体作製時に載荷面側が高密度になり、供試体底部が低密度になる傾向にあることから、図 3.2.2-9 中の上下端面（ $\pm 20\text{mm}$  付近）の密度低下は供試体作製時のものだと考えられる。また、ピストン側（ $\pm 0\text{mm}$  付近）での密度低下が試験中の膨潤によるものだとすると、本直列膨潤量試験のケースで膨潤挙動が非常に緩慢だった原因である可能性がある。ピストン側でこのように乾燥密度が低下したことは、供試体とピストンの間に隙間が存在したと考えられるため、今後の試験をする際には十分に密着させた状態で試験を実施するための対策を講じる必要がある。

表 3.2.2-2 直列膨潤量試験の解体結果

供試体	供試体番号	分割高さ $\Delta H$ (mm)	含水比 W (%)	乾燥密度 $\rho_d$ Mg/m <sup>3</sup>	飽和度 Sr %
低密度供試体	①	1.511	41.41	1.290	102.2
	②	1.965	32.81	1.410	96.9
	③	1.961	32.69	1.431	99.5
	④	1.960	32.52	1.426	98.2
	⑤	1.960	32.00	1.437	98.3
	⑥	1.959	32.00	1.435	98.0
	⑦	1.958	31.94	1.428	96.7
	⑧	1.958	32.22	1.408	94.8
	⑨	1.958	32.58	1.417	97.1
	⑩	1.958	41.70	1.319	107.5
	平均値			34.19	1.400
高密度供試体	①	0.939	24.12	1.727	115.6
	②	1.878	20.67	1.783	108.5
	③	1.877	20.45	1.790	108.6
	④	1.877	20.25	1.799	109.2
	⑤	1.877	20.36	1.771	104.9
	⑥	1.878	20.68	1.756	103.9
	⑦	1.877	20.52	1.782	107.5
	⑧	1.878	20.23	1.796	108.5
	⑨	1.878	21.32	1.743	104.8
	⑩	2.090	21.73	1.711	101.6
	⑪	1.679	33.19	1.290	82.0
	平均値			22.14	1.723

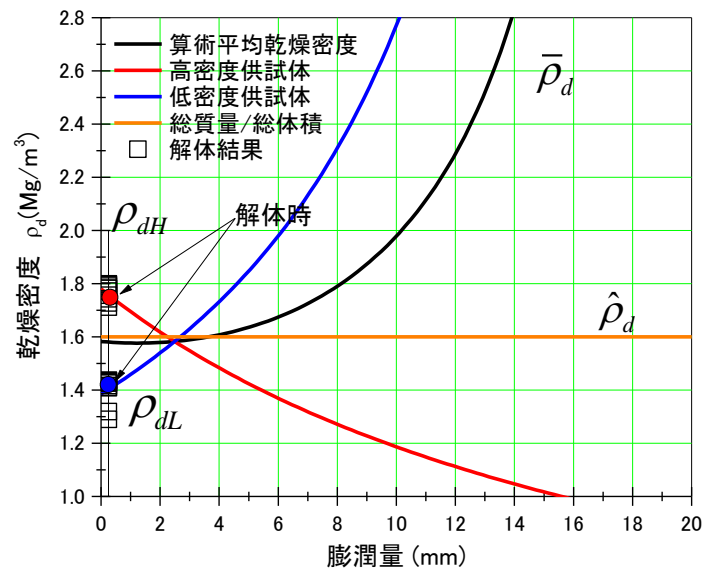


図 3.2.2-8 膨潤量に対する個々の供試体の乾燥密度と平均乾燥密度の変化

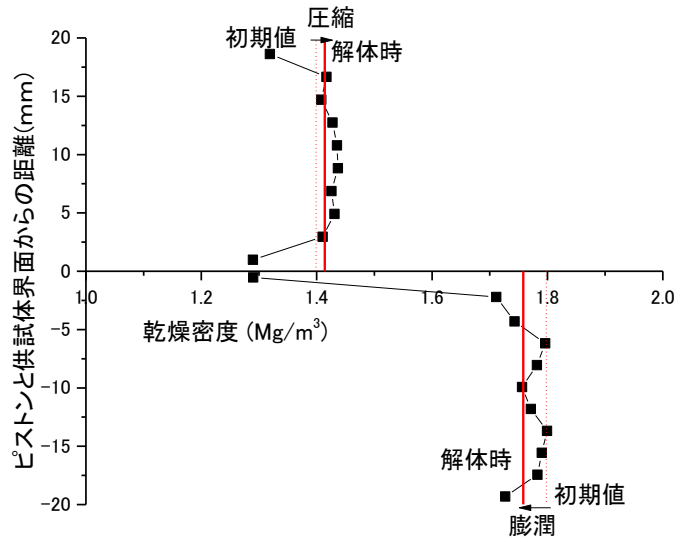


図 3.2.2-9 直列膨潤量試験の乾燥密度分布

b 乾燥密度  $1.5\text{Mg/m}^3 - 1.7\text{Mg/m}^3$  ケース

乾燥密度  $1.5\text{Mg/m}^3 - 1.7\text{Mg/m}^3$  ケースでも、乾燥密度乾燥密度  $1.4\text{Mg/m}^3 - 1.8\text{Mg/m}^3$  のケースと同様に供試体を解体した。

表 3.2.2-3 に乾燥密度が  $1.5\text{Mg/m}^3$  と  $1.7\text{Mg/m}^3$  を直列させたケースの解体結果を示す。低密度供試体と高密度供試体のどちらもほぼ飽和した状態であることが分かる。図 3.2.2-10 には、膨潤量から算出した平均乾燥密度とスライスした各試料の乾燥密度を併せて示している。図から、膨潤量から算出した平均乾燥密度と解体結果は概ね整合する結果となった。両供試体共に十分に飽和しているのにも拘らず密度分布が明確に残っていることから、緩衝材の施工時に密度分布が発生すると膨潤後でもある程度の密度分布が残留するものと考えられる。

図 3.2.2-11 には、解体時の密度分布と供試体作製時と解体直前の平均乾燥密度を併せて示す。図から、供試体内部には密度分布があることが分かる。高密度供試体の底面で乾燥密度の低下が観察された。また、低密度供試体のピストン側では乾燥密度の増加が観察された。供試体作製時に載荷面側が高密度になり、供試体底部が低密度になる傾向にあることから、高密度供試体の底面の密度低下は供試体作製時のものだと考えられる。また、低密度供試体は全体的に均一な乾燥密度分布であることから、ピストン側( $\pm 0\text{mm}$  付近)での密度増加が試験中の膨潤によるものだと考えられる。

表 3.2.2-3 直列膨潤量試験の解体結果

供試体	供試体番号	分割高さ $\Delta H$ (mm)	含水比 W (%)	乾燥密度 $\rho_d$ Mg/m <sup>3</sup>	飽和度 Sr %
低密度供試体	①	1.010	30.74	1.493	103.0
	②	2.020	27.48	1.473	89.5
	③	2.019	27.35	1.489	91.1
	④	2.018	27.10	1.484	89.6
	⑤	2.019	27.54	1.482	90.9
	⑥	2.020	26.05	1.509	89.5
	⑦	2.020	26.12	1.526	92.1
	⑧	2.020	25.77	1.542	93.1
	⑨	2.020	26.95	1.573	102.0
	⑩	1.707	31.19	1.495	104.9
		平均値		27.63	1.507
高密度供試体	①	2.032	22.53	1.642	94.9
	②	2.328	22.06	1.643	93.1
	③	1.985	21.37	1.661	92.8
	④	1.985	21.07	1.670	92.7
	⑤	1.986	21.14	1.657	91.2
	⑥	1.986	22.27	1.647	94.6
	⑦	1.985	22.72	1.631	94.1
	⑧	1.985	22.52	1.626	92.6
	⑨	1.985	23.06	1.601	91.1
	⑩	1.985	25.74	1.554	94.6
		平均値		22.92	1.622

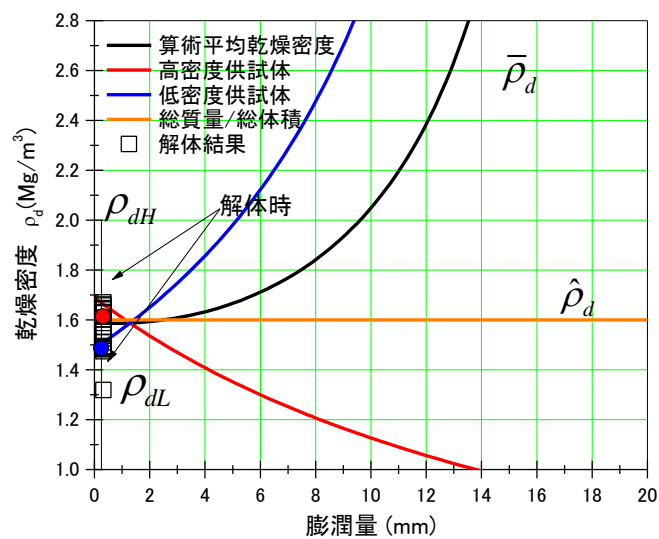


図 3.2.2-10 膨潤量に対する個々の供試体の乾燥密度と平均乾燥密度の変化

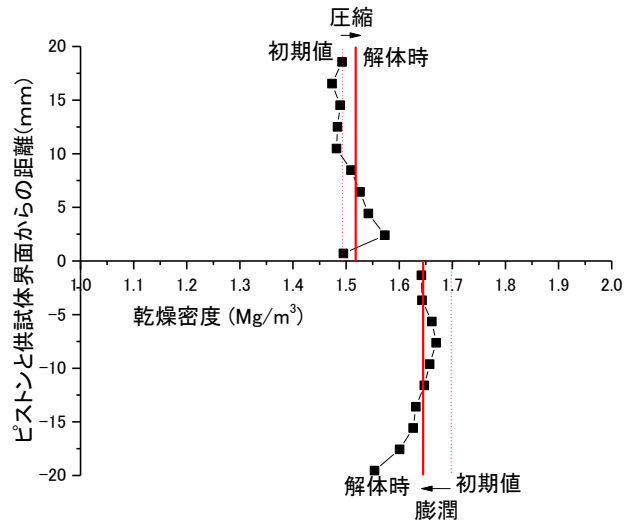


図 3.2.2-11 直列膨潤量試験の乾燥密度分布

### (3) 試験結果 (NaCl 水溶液ケース)

#### 1) 膨潤量

図 3.2.2-12 にイオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液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た。本来、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イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液を用いて実施した場合の試験結果は、どちら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、イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液を用いて実施した場合の方が、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/m<sup>3</sup> と 1.8Mg/m<sup>3</sup> の場合の蒸留水のケースが他のケースに比べて膨潤挙動が非常に緩慢であるため、蒸留水のケースとイオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液のケースの膨潤量が逆転している。逆に言えば、他のケースの膨潤量の差異から、乾燥密度 1.4Mg/m<sup>3</sup> と 1.8Mg/m<sup>3</sup> の場合の蒸留水のケースの膨潤量は現状よりも大きくなることが予想される。そのため、定常になるにはさらに試験を継続する必要がある。

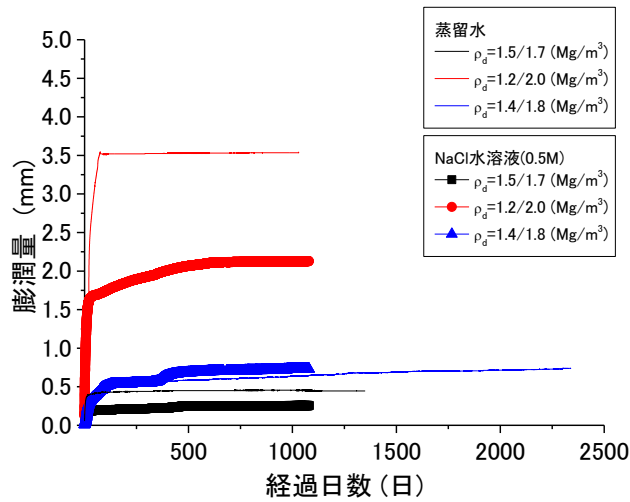


図 3.2.2-12 膨潤量の経時変化(NaCl 水溶液)

図 3.2.2-13 には、前述の膨潤量から算出した直列膨潤量試験中のイオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液を用いて実施した場合の乾燥密度の経時変化を示す。この図も、同様に、前述の蒸留水のケースも比較のために併せて示している。図から、蒸留水のケースに比べて NaCl 水溶液のケースの方が、残留密度差は大きいことが分かる。さらに、初期の密度差が大きいものほど、残留密度差が、大きくなることが分かる。

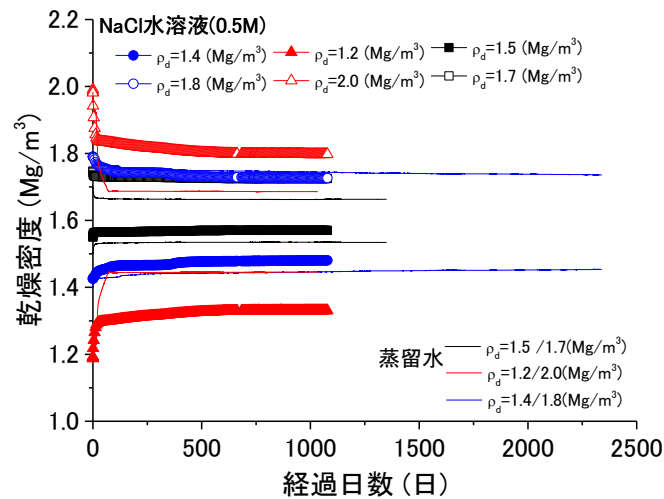


図 3.2.2-13 膨潤に伴う乾燥密度の経時変化(NaCl 水溶液)

図 3.2.2-14 には、NaCl 水溶液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。この図も、前述の蒸留水のケースを比較のために併せて示している。図から、イオン強度の影響により、蒸留水のケースに比べ、NaCl 水溶液ケースの方が膨潤圧は小さい傾向にある。

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 NaCl 水溶液ケースでは、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  $1.4\text{Mg/m}^3$  と  $1.8\text{Mg/m}^3$  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  $1.4\text{Mg/m}^3$  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  $1.8\text{Mg/m}^3$  の供試体の膨潤量が乾燥密度  $1.4\text{Mg/m}^3$  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ものと考えられる。また、同様の原因で、乾燥密度  $1.4\text{Mg/m}^3$  と  $1.8\text{Mg/m}^3$  の場合において膨潤量が小さめになっているものと考えられる。

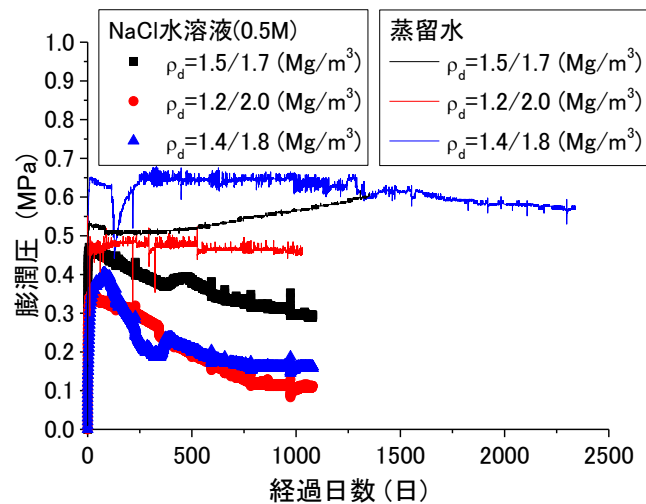


図 3.2.2-14 直列膨潤量試験中の膨潤圧の経時変化(NaCl 水溶液)

図 3.2.2-15 には NaCl 水溶液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が、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  $1.2\text{Mg/m}^3$  と  $2.0\text{Mg/m}^3$  のケースでは、乾燥密度  $2.0\text{Mg/m}^3$  の供試体の膨潤に伴って、乾燥密度  $1.2\text{Mg/m}^3$  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。

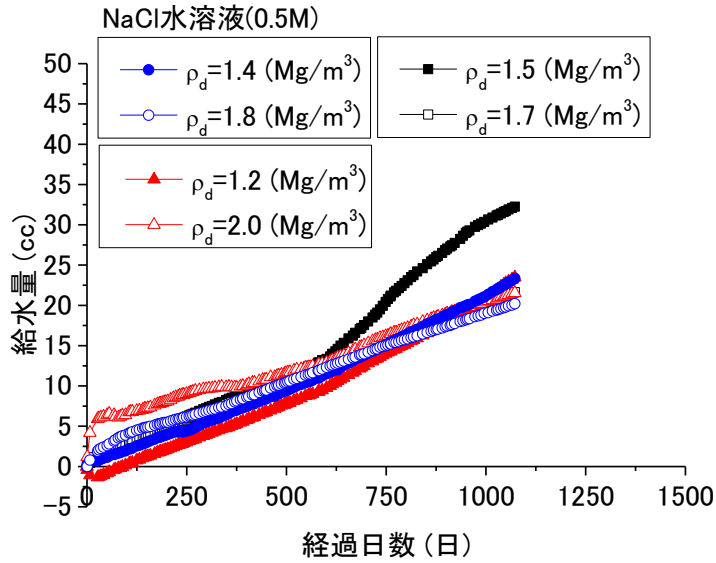


図 3.2.2-15 直列膨潤量試験中の給排水量の経時変化(NaCl 水溶液)

### 3.2.3 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 3.2.3-1 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。

- 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）によって行い、排水は集水瓶で集めイオン分析する。
- 図 3.2.2-1 と同様の試験機を用いて試験を実施する。まず、上部供試体（乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$ ）と下部供試体（乾燥密度  $1.8\text{Mg/m}^3$ ）を試験機にセットし飽和させる（NaCl 水溶液の場合は、上部供試体の乾燥密度： $1.7\text{Mg/m}^3$ ）と下部供試体の乾燥密度： $1.8\text{Mg/m}^3$ ）。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  $1.8\text{Mg/m}^3$  から  $1.6\text{Mg/m}^3$  (NaCl 水溶液の場合は  $1.7\text{Mg/m}^3$ ) 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、NaCl 水溶液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 ( $3520\text{g}$ ) を相殺するカウンタウェイトを配置する (図 3.2.3-2)。

試験ケースを表 3.2.3-1 に示す。表には、表には、今年度から開始する試験水として、0.5M の NaCl 水溶液を使用したケース 1s~3s も記載している。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 3.2.3-3 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  $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$  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  $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$  に静的に締固めた後に乾燥密度  $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$  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 3.2.3-4 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。蒸留水を用いた正規圧密供試体と過圧密供試体の直列膨潤量試験は、長期間に亘って定常状態となったため、後述する手順で解体を行った。また、再現性を確認する目的で、再度、同条件の試験を実施した(Case2-2)。ただし、後述する解体の結果、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うこととした。この工程の変更は、NaCl 水溶液を用いた Case2s や Case3s の場合も同様である。

蒸留水を用いた正規圧密の試験ケースでは、乾燥密度  $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$  まで圧縮した供試体をそのまま膨潤圧試験に供したが、他のケースに比べて非常に早期に試験を終了したため、Case1-2 として再度試験を実施して、ほぼ定常状態に達したと判断されたため解体した。

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  $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$  まで圧縮したものを  $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$  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  $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$  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、後続開始の試験は、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  $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$  での値となることに注意が必要である。本ケースにおいても、ほぼ定常状態に達したと判断されたため解体した。

表 3.2.3-1 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 <sup>3</sup> )	低乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	有効ベントナイト乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )		初期含水比 (%)		応力履歴	平均乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	液種	備考
1	1.584(NC) (1.6)		1.351		25.91		正規	1.6 (ケイ砂 30wt% 混合 Na 型 ベントナイト)	蒸留水	終了
1-2	1.610(NC) (1.6)		1.379		22.33		正規			解体
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			終了
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			再現性確認中
3	1.798 →1.605 (OC) (1.8→1.6)		1.581 →1.368		18.97		過圧密			解体
1s	1.612(NC) (1.6)		1.381		24.69		正規		NaCl 水溶液  0.5M	継続中
2s	1.800→※ (1.8→1.7)	1.700 (1.7)	1.584→ ※	1.475	18.40	21.60	正規+ 過圧密			継続中
3s	1.810→※ (OC) (1.8→1.7)		1.595→※		17.96		過圧密			継続中

➤ \*飽和終了後に膨潤過程に移行  
➤ ( )は計画値

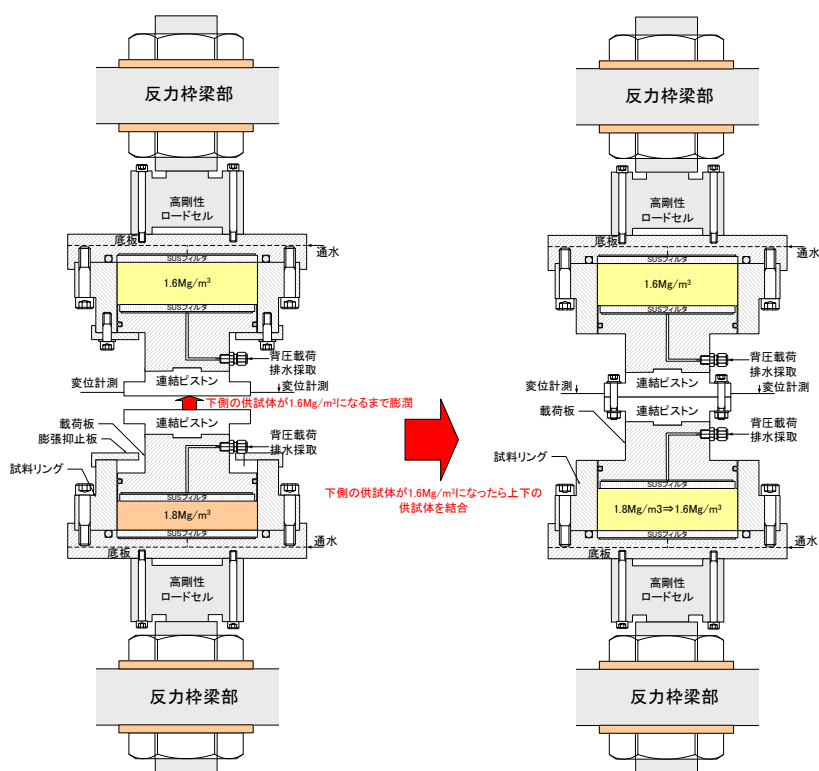


図 3.2.3-1 応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験の詳細図



図 3.2.3-2 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機

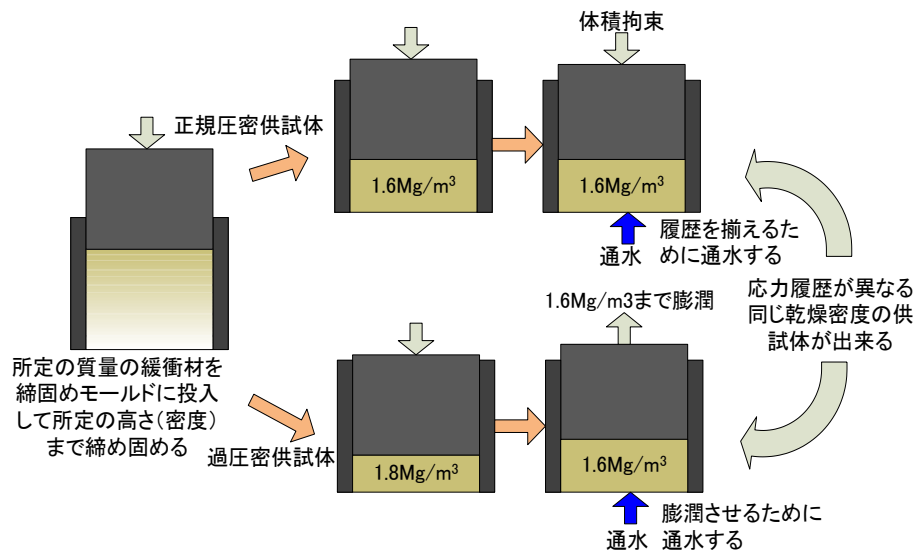


図 3.2.3-3 応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験の供試体調整手順

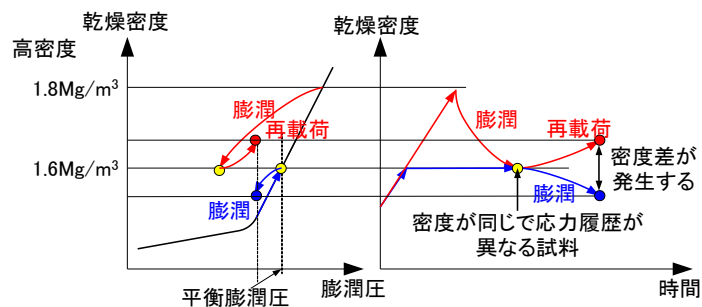


図 3.2.3-4 密度分布、及び膨潤量試験のイメージ

## (2) 試験結果 (蒸留水のケース)

### 1) 膨潤量

図 3.2.3-5 に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の給水量の経時変化を示す。ビューレットによる水位差のみでは飽和に時間がかかることから、両供試体に二重管ビューレットで背圧を 0.2MPa 作用させて飽和を促進させた。これにより排水が確認され、過圧密供試体は通水開始から 600 日後に膨潤過程に移行した。この際に、背圧を大気圧に戻し、ビューレットの水位差 (30 cm 程度) のみで給水を継続した。

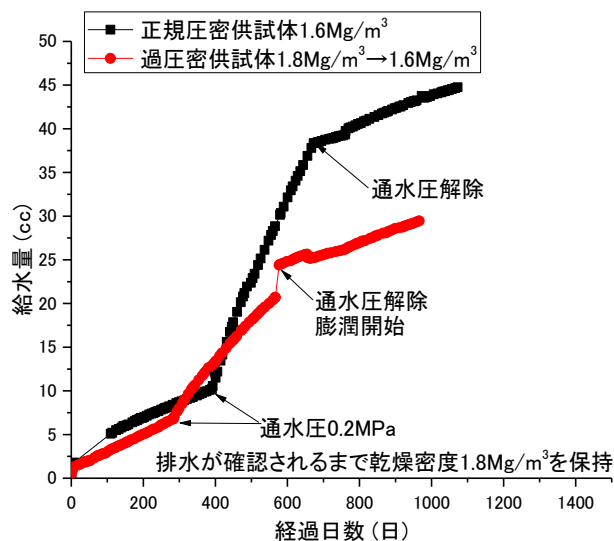


図 3.2.3-5 Case2-2 の給水量の経時変化

図 3.2.3-6 には、過圧密 (1.6Mg/m<sup>3</sup>) と正規圧密 (1.6Mg/m<sup>3</sup>) の直列供試体の試験ケースの再現性確認結果を示す。図から、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が明確に表れており、図 3.2.3-4 に示した結果の再現性が確認できていることが分かる。

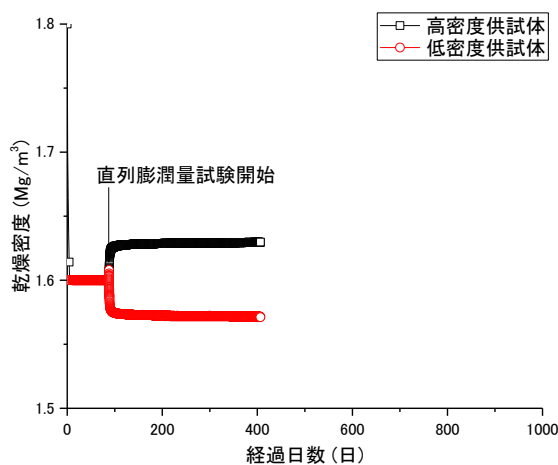


図 3.2.3-6 膨潤に伴う乾燥密度の経時変化に応力履歴が及ぼす影響 (再現性確認)

さらに、図 3.2.3-7 には、過圧密供試体の膨潤過程における膨潤量の経時変化を示す。図から、概ね目標としている乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  に到達していることが分かった。このため、直列膨潤量試験に移行した。図に示すように、直列膨潤量試験に移行したところ、過圧密供試体は正規圧密供試体に押し戻されていることが分かる。

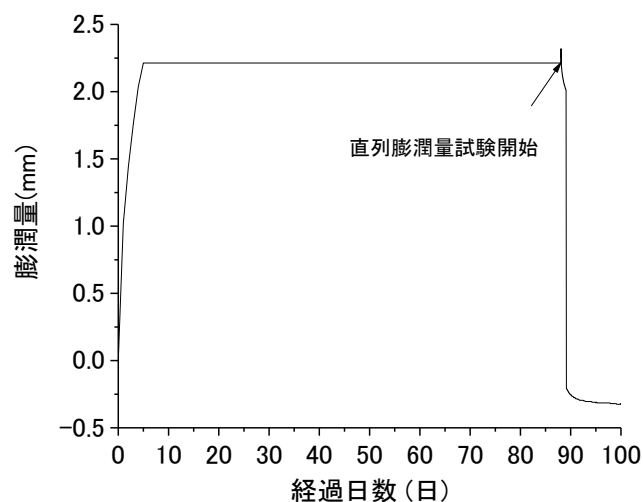


図 3.2.3-7 Case2-2 の膨潤量の経時変化

以上から、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、という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の再現性が確認されたと言える。

図 3.2.3-8 に正規圧密 ( $1.6\text{Mg/m}^3$ ) 単体供試体、過圧密 ( $1.6\text{Mg/m}^3$ ) と正規圧密 ( $1.6\text{Mg/m}^3$ ) の直列供試体、および過圧密 ( $1.6\text{Mg/m}^3$ ) 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 ( $1.6\text{Mg/m}^3$ ) と正規圧密 ( $1.6\text{Mg/m}^3$ ) 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  $0.55\text{MPa}$  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  $0.5\text{MPa}$  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  $0.4\text{MPa}$  から  $0.6\text{MPa}$  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、再現性確認の目的で再度膨潤圧試験実施した(Case1-2)。過圧密の供試体の膨潤圧が上昇した理由については、再試験も含めて検討する必要がある。

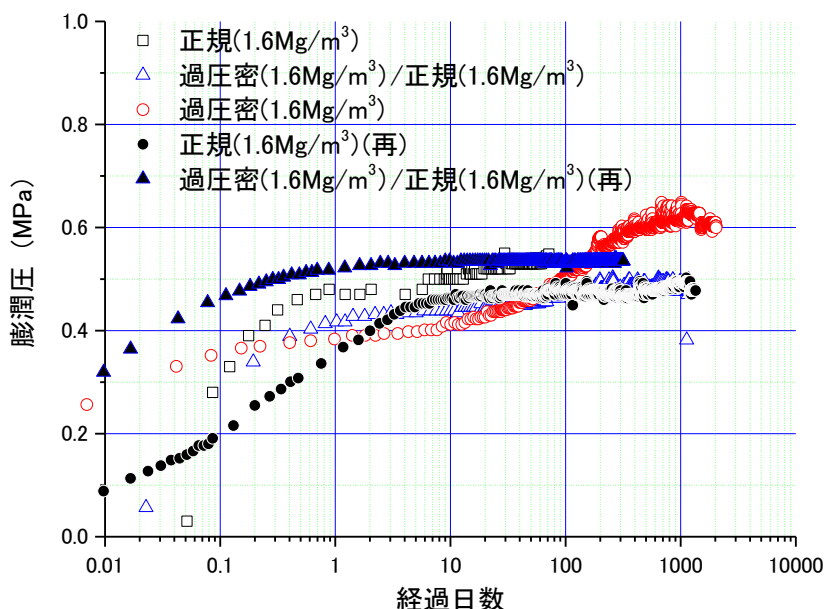


図 3.2.3-8 応力履歴が膨潤挙動に及ぼす影響評価 (膨潤圧の経時変化)

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、後述する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に、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 3.2.3-6 や図 3.2.3-8 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

### a 正規圧密供試体 (1.6Mg/m<sup>3</sup>) の解体

正規圧密供試体 (1.6Mg/m<sup>3</sup>) の解体でも図 3.2.2-7 に示した超音波カッターを用いた供試体スライサーを使用した。

表 3.2.3-2 に解体結果を示す。解体結果から、概ね均一に飽和した状態であることが分かった。

図 3.2.3-9 には、解体時の密度分布と供試体作製時と解体直前の平均乾燥密度を併せて示す。図から、供試体はほぼ均一な乾燥密度であるが、供試体の上端面で若干密度低下みられる。他の解体ケースでも同様の結果が見られたことから、供試体とピストンの間に隙間が存在する可能性がある。



表 3.2.3-2 直列膨潤量試験の解体結果

供試体	供試体番号	分割高さ $\Delta H$ (mm)	含水比 W (%)	乾燥密度 $\rho_d$ Mg/m <sup>3</sup>	飽和度 Sr %
低密度供試体	①	1.985	27.64	1.559	102.5
	②	1.984	26.12	1.562	97.3
	③	1.984	25.29	1.573	95.7
	④	1.984	25.42	1.558	94.0
	⑤	1.984	25.37	1.571	95.7
	⑥	1.984	24.43	1.597	95.9
	⑦	1.984	24.80	1.597	97.5
	⑧	1.984	24.32	1.606	96.9
	⑨	2.029	23.90	1.551	87.6
	⑩	1.985	29.25	1.483	96.7
		平均値		25.65	1.566

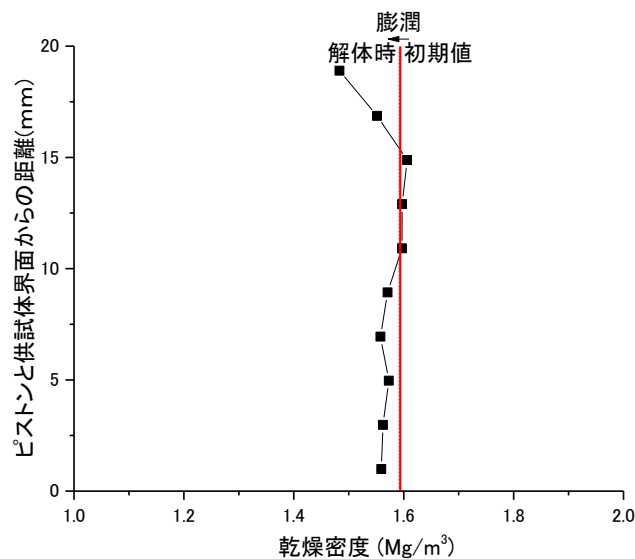


図 3.2.3-9 直列膨潤量試験の乾燥密度分布

b 過圧密供試体 (1.6Mg/m<sup>3</sup>) の解体

表 3.2.3-3 に解体結果を示す。概ね均一に飽和した状態であった。

図 3.2.3-10 には、解体時の密度分布と供試体作製時と解体直前の平均乾燥密度を併せて示す。図から、過圧密 (1.6Mg/m<sup>3</sup>) と正規圧密 (1.6Mg/m<sup>3</sup>) の直列供試体の解体と同様に、供試体の上下端面で密度低下みられる。給水側のみならず、排水側でも密度低下がみられることから、膨潤量試験中の密度変化 (膨潤領域) に関して、詳細に検討する必要がある。なお、本

試験では、過圧密（1.6Mg/m<sup>3</sup>）と正規圧密（1.6Mg/m<sup>3</sup>）の直列供試体の選考試験と同様に、飽和させながら膨潤させたためにこのような結果になった可能性がある。前述の過圧密（1.6Mg/m<sup>3</sup>）と正規圧密（1.6Mg/m<sup>3</sup>）の直列供試体の再現性確認試験のように、十分に飽和させた後に膨潤させる方法にするとこの供試体上下端面での密度低下は解消される可能性がある。

過圧密供試体は、図 3.2.3-8 に示したように、他の試験ケースに比べ、膨潤圧が大きいのが、解体の結果から、特段、膨潤圧が大きくなる原因は見受けられなかった。ただし、密度が全体的に低下しており、供試体全体が十分に膨潤しているといえる。

表 3.2.3-3 直列膨潤量試験の解体結果

供試体	供試体番号	分割高さ ΔH (mm)	含水比 W (%)	乾燥密度 ρ <sub>d</sub> Mg/m <sup>3</sup>	飽和度 Sr %
低密度供試体	①	0.980	37.07	1.426	112.4
	②	1.961	28.86	1.518	100.5
	③	1.964	25.20	1.604	100.0
	④	1.963	23.42	1.638	98.0
	⑤	1.960	23.38	1.637	97.8
	⑥	1.961	23.67	1.636	98.7
	⑦	1.961	24.08	1.612	96.9
	⑧	1.960	23.03	1.636	96.0
	⑨	1.960	23.88	1.555	87.9
	⑩	2.119	33.20	1.468	107.1
	平均値			26.58	1.573

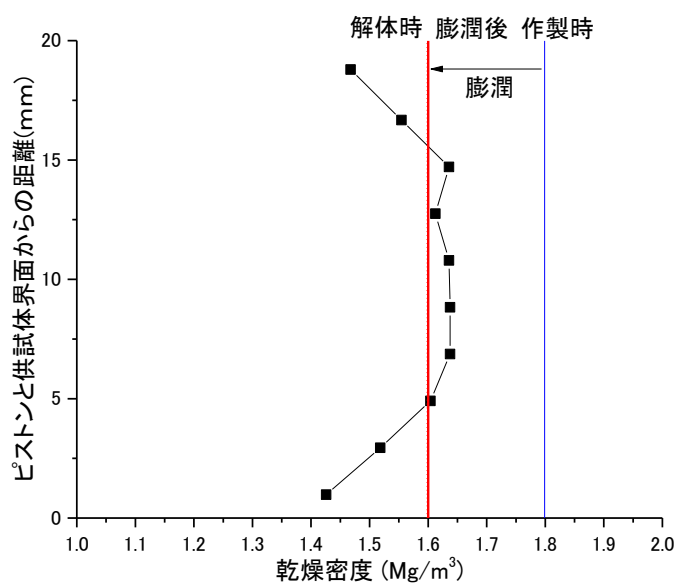


図 3.2.3-10 直列膨潤量試験の乾燥密度分布

### (3) 試験結果 (NaCl 水溶液ケース)

#### 1) 膨潤量の経時変化

図 3.2.3-11 に、イオン強度 0.5 の NaCl 水溶液を用いて実施した直列膨潤量試験のうち、過圧密供試体の膨潤量の経時変化を示す。図には、前述の蒸留水を用いて実施した直列膨潤量試験の過圧密供試体の膨潤量の経時変化も比較のために併せて示している。図から、蒸留水のケースは 1 週間程度、NaCl 水溶液のケースは 2 週間程度で膨潤量が平衡状態に達している。しかしながら、イオン強度の影響により、NaCl 水溶液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、図 3.2.3-12 に示すように、NaCl 水溶液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  $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$  に達していない。この結果から、イオン強度 0.5 の NaCl 水溶液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  $1.7\text{Mg}/\text{m}^3$ 、過圧密供試体の乾燥密度は  $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$  を飽和後に  $1.7\text{Mg}/\text{m}^3$  に膨潤させた後に直列に繋ぐこととした。

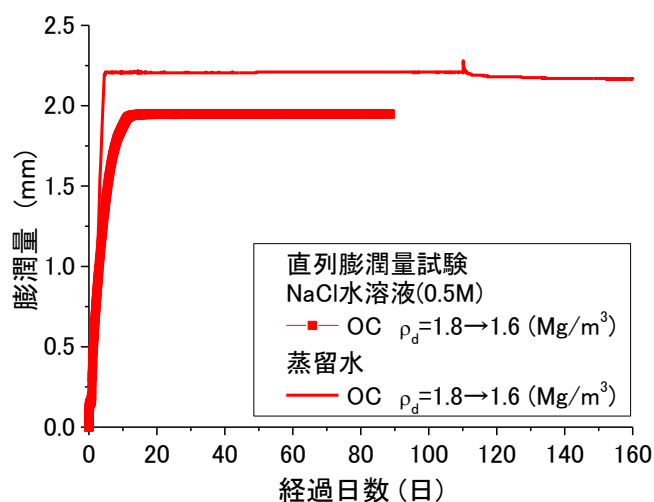


図 3.2.3-11 直列膨潤量試験の膨潤量の経時変化 (NaCl ケース)

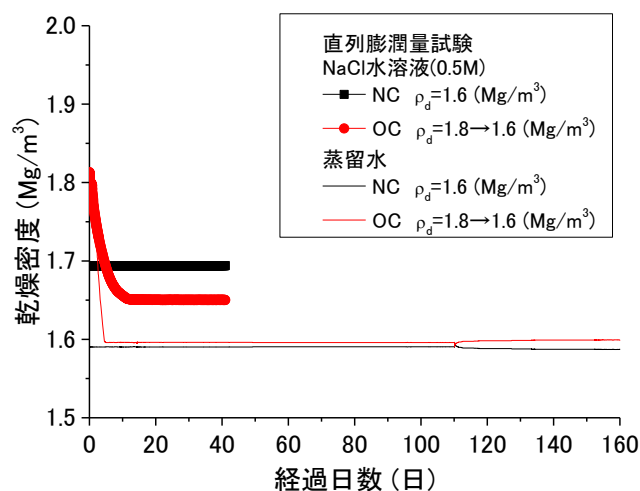


図 3.2.3-12 直列膨潤量試験の乾燥密度の経時変化 (NaCl ケース)

図 3.2.3-13 に、イオン強度 0.5 の NaCl 水溶液を用いて、正規圧密供試体の乾燥密度は  $1.7\text{Mg}/\text{m}^3$ 、過圧密供試体の乾燥密度は  $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$  を飽和後に  $1.7\text{Mg}/\text{m}^3$  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。図から、過圧密供試体が乾燥密度  $1.7\text{Mg}/\text{m}^3$  に膨潤し、定常状態に至っていることが分かる。

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 3.2.3-13 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。

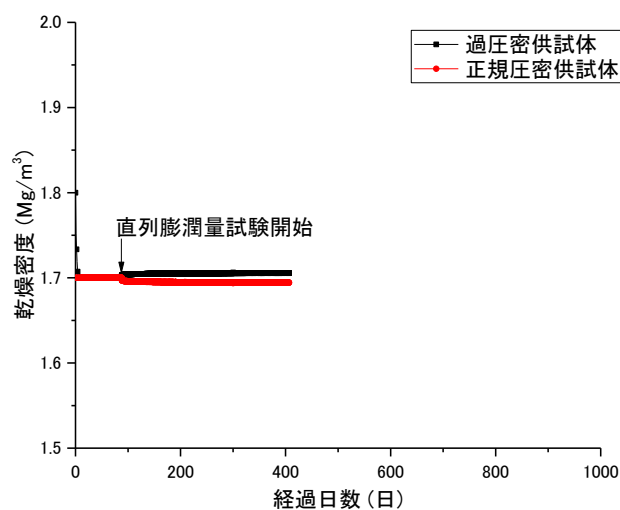


図 3.2.3-13 直列膨潤量試験の乾燥密度の経時変化 (NaCl ケース)

## 2) 膨潤圧の経時変化

図 3.2.3-14 には、NaCl 水溶液を用いた場合の正規圧密供試体、過圧密供試体単体の膨潤圧の経時変化を示している。正規圧密供試体と過圧密供試体の直列膨潤量試験はピストンを連結するまで膨潤圧を計測できないため膨潤圧はほぼゼロである。また、図には、前述の蒸留水のケースの結果も併せて示している。

図から、NaCl のケースの過圧密供試体単体の膨潤圧が他のケースに比べて非常に大きい、これは過圧密供試体の膨潤前の飽和段階のものである。この飽和段階は、蒸留水のケースの過圧密供試体の解体結果として密度分布が大きかったことから、NaCl 水溶液のケースでは、なるべく過圧密供試体の密度分布を小さくするために、過圧密供試体を乾燥密度  $1.7\text{Mg}/\text{m}^3$  まで膨潤させる前に十分に飽和させる設けた過程である。飽和段階の乾燥密度は  $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$  で一定のため、他のケースよりも膨潤圧が大きくなっている。膨潤圧が吸水に伴って急激に低下しているが、これは供試体作製時の締め固め圧力が、給水に伴って解放されたためであると考えられる。

正規圧密供試体単体の膨潤圧は、給水開始から単調減少傾向を示し蒸留水のケースより小さくなっている。これは、間隙水のイオン強度が膨潤圧に及ぼす影響によるものと考えられる。

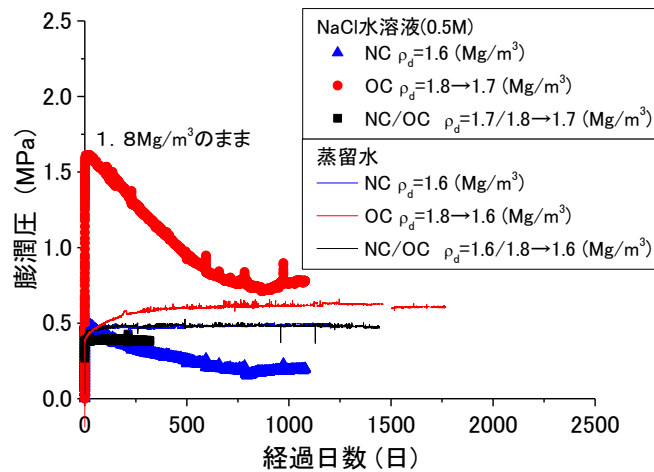


図 3.2.3-14 応力履歴の影響評価試験の膨潤圧の経時変化

### 3) 給水状況

図 3.2.3-15 には、NaCl 水溶液を用いた場合の正規圧密供試体、過圧密供試体単体の膨潤圧試験中の給水量、さらに正規圧密供試体と過圧密供試体の直列膨潤量試験中の給水量を示している。図から、過圧密供試体単体のケースと正規圧密供試体単体のケースの給水量はほぼ同等であり、直列膨潤量試験の正規圧密供試体と過圧密供試体の給水量が同等である。正規圧密供試体（乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$ ）の間隙体積が  $19\text{cm}^3$  程度と過圧密供試体（乾燥密度  $1.8\text{Mg/m}^3$ ）の間隙体積が  $23\text{cm}^3$  程度であることから、既に十分な量の NaCl 水溶液を供給している。蒸発散や排水経路の間隙体積分により、未だに排水は確認されていない。過圧密供試体は、排水経路内の排水の有無などを確認して飽和と見なせるようであれば膨潤過程に移行するつもりである。

さらに、直列膨潤量試験の正規圧密供試体と過圧密供試体には、二重管ビューレットで  $0.2\text{MPa}$  の通水圧を作用させて飽和過程の促進を開始した。その結果、300 日程度で十分な排水が確認されたため、通水圧を解除して、過圧密供試体は膨潤過程に移行した。

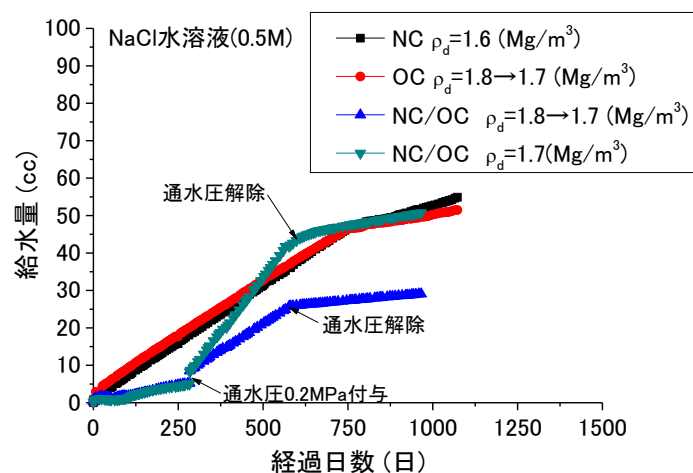


図 3.2.3-15 応力履歴の影響評価試験に用いた供試体の給水量

(4) 残留密度差の理論的解釈に資するデータ取得

1) 試験方法

残留密度差を弾塑性力学に立脚して説明しようとする試みは、残留密度差の推定や緩衝材の許容される密度分布などの施工方法に対する仕様の決定につながる可能性があり、非常に重要である[2]。しかしながら、本検討で実施している乾燥密度 1.2~2.0Mg/m<sup>3</sup>の緩衝材の膨潤挙動を説明できる非常に幅広い応力レベルで実施された圧密試験結果が存在しないため、現状では、比較的幅広い応力レベルで Sasakura ら[3]によって取得されたクニゲル V1 の一次元段階載荷圧密試験から得られる乾燥密度・logp 関係（応力ひずみ関係）を用いるより他はない。ただし、この結果は 2002 年のクニゲル V1 を用いた試験結果であり材料ロットが異なることや、乾燥密度 1.2Mg/m<sup>3</sup> 付近の正規圧密曲線が不足していることなどから、本検討で実施した直列膨潤量試験から得られた残留密度差の結果を理論的に説明するためには、乾燥密度・logp 関係を新たに取得することが望ましい。そこで、表 3.2.3-4 に示した試験ケースについて圧密試験を実施した。Case 1 は、あらかじめ不飽和で静的に締め固めた供試体を圧密セル内で飽和させた後に圧密するものであり、Case2 は圧密セル内に液性限界程度に調整したスラリー状のベントナイトを入れ、そのまま圧密に供するものである。最後に Case3 は、直径 500 mm×高さ 500 mm程度の子備圧密容器内に液性限界程度に調整したスラリー状のベントナイトをいれ、予備圧密した後に、サンプラーでコア抜きしたものを圧密試験に供するものである。Case3 で予備圧密した試料は、今後、圧密以外の力学試験にも供することが可能である。

表 3.2.3-4 圧密試験ケース

ケース	初期乾燥密度 Mg/m <sup>3</sup>	含水比 %	高さ mm	直径 mm	試験手順	備考
1	1.0	10	20	60	乾燥密度 載荷：1.2 Mg/m <sup>3</sup> ⇒2.0 Mg/m <sup>3</sup> 除荷：2.0 Mg/m <sup>3</sup> ⇒1.6 Mg/m <sup>3</sup>	新規 試験セルで飽和
2	スラリー	液性限界程度	20	60	段階載荷により圧密 Case2 の結果に基づいて Case3 の試験条件を協議の 下で決定する。	新規 試験セルでスラ リーから圧密
3	スラリー	液性限界程度	500	500		新規 圧密終了後コア 抜きして試験に 供する

図 3.2.3-16 に Case1 の圧密試験装置を示す。本試験では一般土で用いられる圧密試験機を用いて試験を行う。排水条件は上下面の両面排水である。上面は大気に曝される機械構造となっているため、乾燥を防止するために濡れウエスなどによって対策を施している。下面からの排水量は、ビューレットで計測される。

図 3.2.3-17 には Case2 のベントナイトスラリーの圧密試験装置を示す。ベントナイトスラリーは通常の圧密試験容器では試験することが難しいため、膨潤圧試験容器を用いて試験を実施する。本試験も排水条件は両面排水であり、上下面からの排水量を採水した。



図 3.2.3-16 圧密試験装置 (Case1)



図 3.2.3-17 スラリーの圧密試験装置 (Case2) と採水状況

図 3.2.3-18 には Case3 のベントナイトスラリーの予備圧密試験装置を示す。本試験は、圧密容器として 500mm×600mm の半割れモールドを使用し、そのモールドの中でベントナイトスラリーを圧密した。所定の乾燥密度になった時点でコア抜きし、各種力学試験に供する予定である。



図 3.2.3-18 スラリーの予備圧密試験装置 (Case3)

2) 試験結果

表 3.2.3-5 に各ケースの供試体諸元を示す。Case1 では初期乾燥密度  $1.194\text{Mg/m}^3$ 、Case2 では  $0.282\text{Mg/m}^3$  である。ベントナイトは液性限界が  $307.11\%$  と非常に高いため、Case2 の初期乾燥密度が非常に小さい。Case3 に関しては、含水比  $332\%$  のベントナイトスラリーを 19 回に分けて、空気が入らないようにコテで均しながら所定の高さまで充填した[2]。

表 3.2.3-5 供試体諸元

Case		1	2	3
土粒子密度 $\rho_s$	$\text{Mg/m}^3$	2.707	2.707	2.707
初期含水比 $w_0$	%	40.76	307.11	332.29
供試体初期高さ	cm	1.970	3.760	52.7
供試体面積	$\text{cm}^2$	28.27	28.27	1962.5
供試体体積	$\text{cm}^3$	55.70	106.31	103476.2
初期湿潤質量	g	93.58	122.23	117691.33
初期乾燥質量	g	66.48	30.02	27225.09
初期湿潤密度	$\text{Mg/m}^3$	1.680	1.150	1.137
初期乾燥密度	$\text{Mg/m}^3$	1.194	0.282	0.263
初期飽和度	%	87.1	96.7	96.7
実質供試体高さ	cm	0.869	0.392	49.0



図 3.2.3-19 には緩衝材の  $e\text{-log}p$  関係、図 3.2.3-20 緩衝材の  $\rho_d\text{-log}p$  関係を示す。両図には、小林ら[4]による完全飽和線も示してある。図から、Case1 の  $e\text{-log}p$  関係、 $\rho_d\text{-log}p$  関係は完全飽和線と整合していることが分かる。なお、Case1 で低応力レベルにおいて間隙比が一定なのは、Case1 の試験容器が膨潤しないような機構を有しているためである。

一方、Case2 は、同じ応力レベルで比較すると、完全飽和線よりも高めの間隙比となっているが、圧密圧力を増加するに従って急激に完全飽和線に接近する傾向を示していた。しかしながら、圧密圧力が 0.12~0.64MPa までの間では、荷重増加に対して沈下量（間隙比や乾燥密度の変化割合）がほとんど発生しないという結果となった。スラリー圧密の場合、供試体の剛性が極端に小さい割に沈下量が多いために載荷板の移動量が大きく、載荷板が偏芯して圧密セルに引っ掛かった可能性が高いと判断した。そのため、一旦 0.01MPa まで除荷を行い、再度 0.32MPa まで載荷を行った。この結果、引っ掛かりは解消され、その後の  $e\text{-log}p$  関係は Case1 と同様に完全飽和線と非常に良く整合していることが分かる。このことは、ある乾燥密度のブロック状態で飽和した供試体(Case1)とスラリー状態からある乾燥密度まで圧密して作製した供試体(Case2)、さらには粉体状態から飽和するまで排気圧縮された供試体(完全飽和線)まで、異なる応力履歴を経て作成された供試体でも、正規状態になれば同じ正規圧密曲線を辿ることを意味している。なお、Case2 に関しては引っ掛かりなどの影響を調査するために、同じ条件での検討を開始している。傾向としては、Case2 と同じ正規圧密曲線に向かっており、圧密載荷段階が進めば、再現性の確認ができる予定である。

Case3 に関しては試験の第 1 段階の圧密圧力は、ピストンの自重(6.5kPa)である。第 1 段階の圧密終了後、第 2 段階としてピストン+ピストンの固定治具の自重 19.6kPa を作用させ、さらに圧密終了後に第 3 段階として 46.3kPa の圧密圧力を作用させた。図 3.2.3-19、図 3.2.3-20 に示すように、Case2 の結果と整合する傾向を示している。図 3.2.3-21 には Case3 の圧密沈下曲線を示す。第 3 段階の圧密沈下曲線は、第 1 段階や第 2 段階の物に比べ直線的に圧密が進んでいるが、まだ圧密が終了する傾向は見られない。供試体作成方法の特殊性から、第 1 段階や 2 段階目の圧密沈下曲線には、供試体上面の不陸の解消などによる変形分も含まれるため非常に早期に圧密が終了しているように見える。第 3 段階の圧密終了時間が判明すれば、今後の試験に要する時間も推察できるものと考えられる。

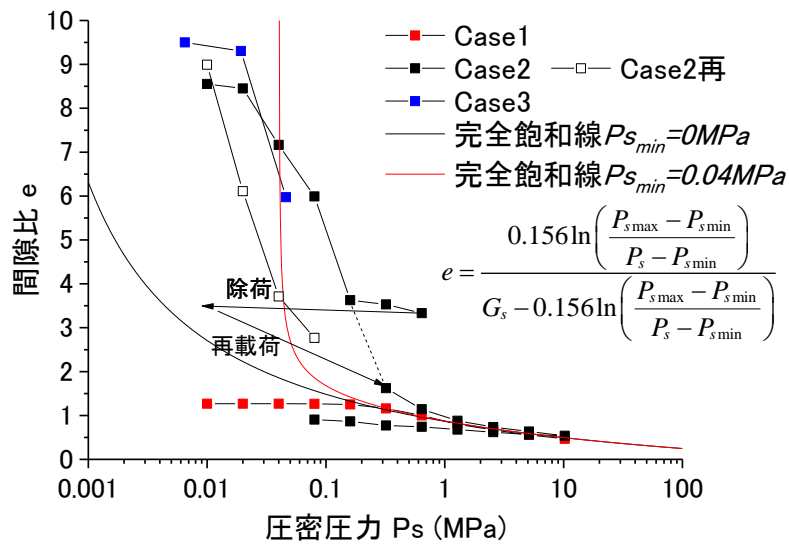


図 3.2.3-19 緩衝材の  $e$ - $\log p$  関係

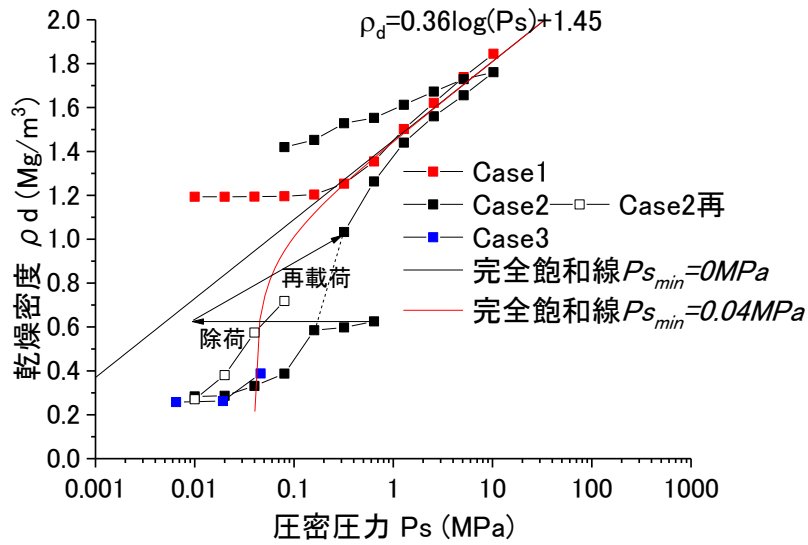


図 3.2.3-20 緩衝材の  $\rho_d$ - $\log p$  関係

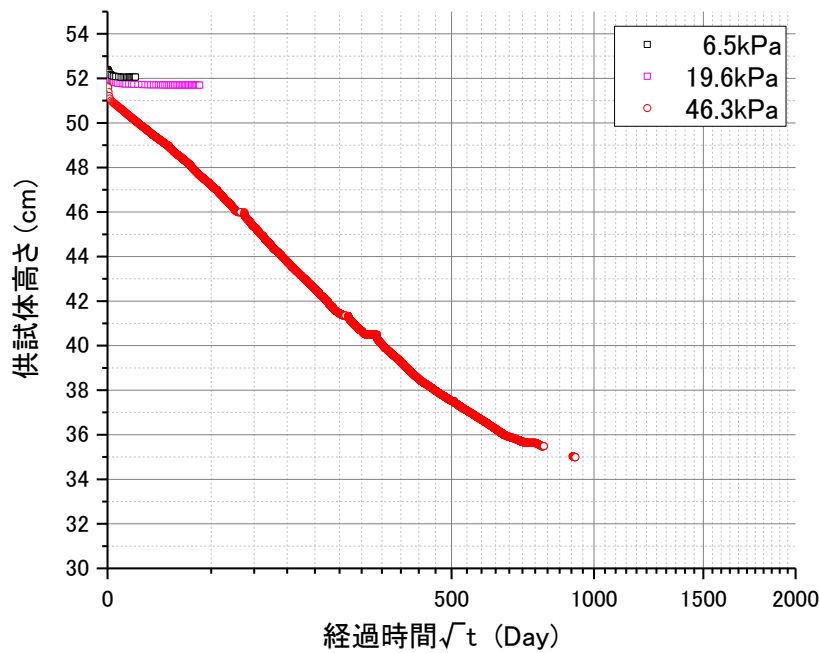


図 3.2.3-21 大型予圧密の圧密沈下曲線(Case3)

### 3.3 施工品質による密度分布の均質化検討 (2次元土槽試験)

#### 3.3.1 施工品質 (密度差) の影響試験の目的

これまでの検討では、小規模試験と称して理想的な系と考えられる条件下で実験を行ってきた。これは、試験条件を極力簡単にして、再冠水中に緩衝材に発生する事象の理解を容易にするためである。そこで本検討では、試験計画の基本概念である“スケールアップ”の方針に従って土槽規模試験を行う。本試験においては、土槽内に施工に伴う密度分布を考慮して緩衝材を設置し、膨潤による密度の均一化状況を調べる。この際、(d)浸潤速度や(e)緩衝材表面近傍の止水性などの事象も複合的に発生することが予想されるため、土槽試験結果の解釈には、(a)膨潤による密度の均一化の試験結果だけでなく、(d)浸潤速度や(e)緩衝材表面近傍の止水性の試験結果の反映も不可欠となる。しかしながら、その一方で、土槽試験から得られる事象は、様々な事象が複合的に発生するものと考えられ、その理解は小規模試験に比べ難しくなることが予想される。そのため、これまでに実施した小規模の試験結果を踏まえて実験結果を解釈することが重要である。

#### 3.3.2 試験方法

本試験は、前項の密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響に関する試験をスケールアップしたものであり、緩衝材の施工法を緩衝材の密度分布、隙間の有無、間隙の大きさなどで代表させている。その上で、様々な地下水組成の条件で緩衝材の施工方法に起因する密度分布などが再冠水時の膨潤挙動、膨潤による均質化挙動に及ぼす影響を土槽試験によって調べた。

試験ケースを表 3.3.2-1 に示す。本検討で考慮する施工方法は、原位置締固め、吹付け、ブロック定置、ペレット充填、さらにブロック定置とペレット充填の併用である。これまでに表 3.3.2-1 に示したケース 1 から 4 で、原位置締固め、吹き付け、ブロック定置、ペレット充填の工法を対象として試験を行った。本報告書では、ブロック定置とペレット充填の併用を対象とした試験について述べる。

給水は土槽の底面から一次元的に行うこととし、再冠水時の挙動を比抵抗計測、膨潤圧分布の計測などで挙動の把握を行った。地下水組成としては平成 27 年度までは蒸留水を用いたケースについての試験を行っていたが、平成 27 年度の後半からイオン強度 0.5 の NaCl 水溶液で試験を実施し、今年度まで継続している。

図 3.3.2-2 に、使用する土槽に施した測定装置を示す。使用した土槽は、幅 700mm、奥行き 150mm、高さ 200mm の緩衝材を設置できる大きさである[2]。また、緩衝材の膨潤圧でも歪むことのない十分な剛性を有している。上蓋は図 3.3.2-2(a)に示すように、穴が開けてあり、そこから図 3.3.2-2(b)に示した上蓋と一体化したロードセルの配線をしている。また、図 3.3.2-2(b)に示した上蓋と一体化したロードセルは、緩衝材に直接接することがないように、非常に剛性の高いジュラコン樹脂で覆っている。さらに、図 3.3.2-2(c)に示すように、土槽の背面には 147 個の電極が設置してあり、電極も緩衝材との接触点以外、樹脂で絶縁してある。この電極は、前述の 3.1 項の緩衝材への地下水浸潤状況の評価で使用しているものと同様のものである。また電極の配置は、ブロックを設置した際にブロックの中心や界面に電極が位置するように配慮した。給水は図 3.3.2-2(d)に示すようにマリOTT管で行い、供試体の水位が供試体上面に至るまで給水した。

表 3.3.2-1 土槽規模試験の試験ケース

ケース	施工方法	密度/間隙/隙間の分布	乾燥密度	注入液	備考
1	原位置締固め	高密度/低密度の互層	ケイ砂 30wt%含有 クニゲル V1 : 1.6 Mg/m <sup>3</sup>  ベントナイト単体 : 1.1Mg/m <sup>3</sup> 程度	蒸留水	実施済み 要素試験から推定
2	吹付け	均一な密度分布			実施済み
3	ブロック定置	界面や隙間を有する			実施済み
4	ペレット充填	大間隙を有する			実施済み
5	ブロック定置・ ペレット充填 併用	ブロック部 : 界面や隙間を有する ペレット部 : 大間隙を有する	ケイ砂 30wt%含有 クニゲル V1 : 1.6 Mg/m <sup>3</sup>  ベントナイト単体 : 1.1Mg/m <sup>3</sup> 程度		実施済み
6	ブロック定置・ ペレット充填 併用	ブロック部 : 界面や隙間を有する ペレット部 : 大間隙を有する	ケイ砂 30wt%含有 クニゲル V1 : 1.6 Mg/m <sup>3</sup>  ベントナイト単体 : 1.1Mg/m <sup>3</sup> 程度	イオン強度 0.5 NaCl 水溶液	継続/解体 【試験中計測項目】 比抵抗分布 膨潤圧分布 給水量 目視観察  【試験後計測項目】 密度分布 飽和度(含水比)分布 ブロック間の界面状況観察

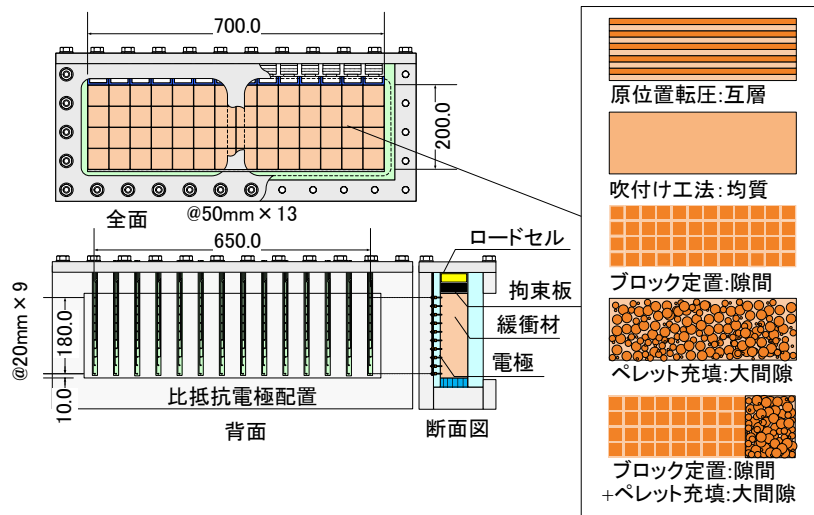


図 3.3.2-1 土槽試験による施工に伴う密度分布を有する緩衝材の均一化試験イメージ図

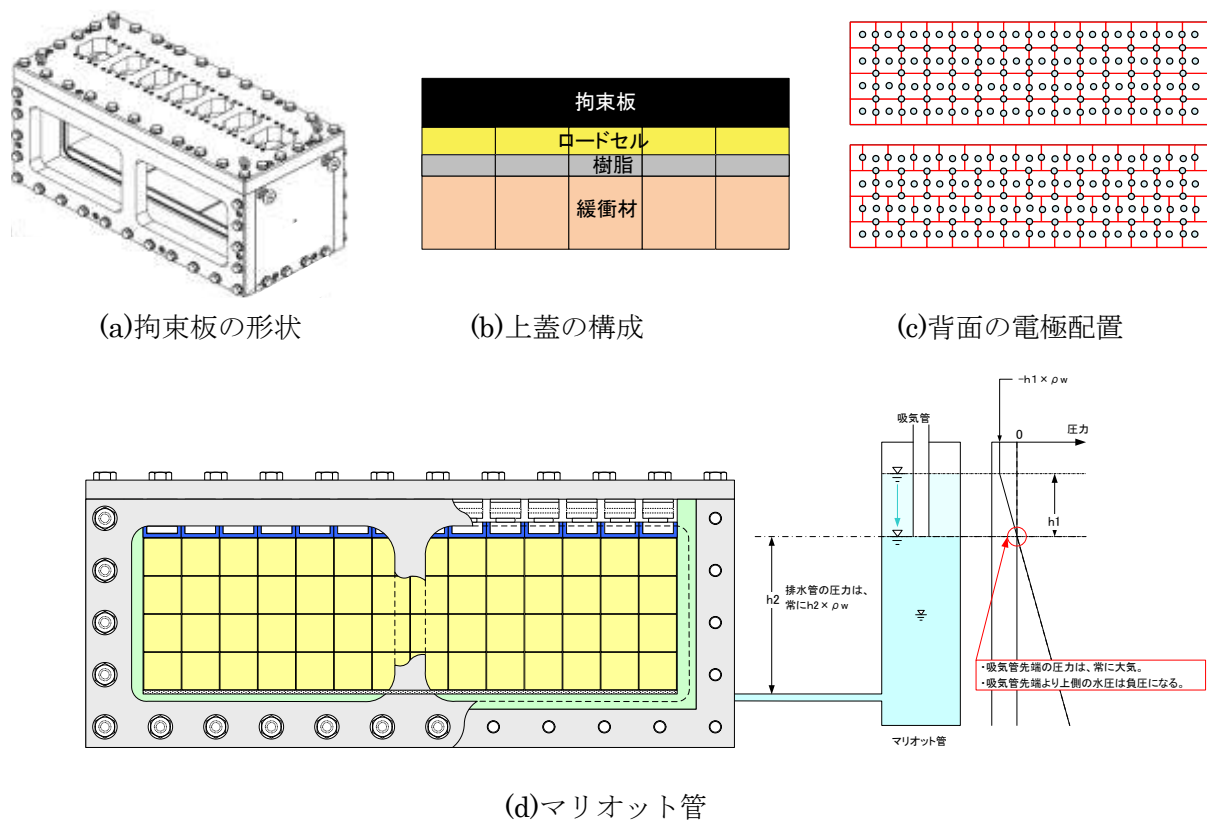


図 3.3.2-2 土槽試験による給水機構

### 3.3.3 試験結果 (0.5M-NaCl 水溶液、ブロック定置とペレット充填併用ケース)

本試験は平成 27 年度にスタートした[2]。本報告書では全期間の結果を以下に示す。表 3.3.3-1 に 0.5 M の NaCl 水溶液を用いたブロック定置とペレット充填併用ケースの供試体諸元を示す。この供試体の間隙体積は、ブロックやペレットの間隙部部分の体積も含めて  $6348.3\text{cm}^3$  である。よって、給水量が  $6348.3\text{cm}^3$  となればマクロ的には供試体は飽和したことになる。

表 3.3.3-1 ブロック定置とペレット充填併用ケースの供試体諸元

高さ (cm)	供試体ブロック部	20.0	供試体ペレット部	20.0	供試体全体	20.0
幅 (cm)		53.0		17.0		70.0
奥行 (cm)		15.0		15.0		15.0
体積 (cm <sup>3</sup> )		15900.0		5100.0		21000.0
湿潤質量 (g)		27983.2		6123.8		34107.0
湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )		1.8		1.2		1.6
含水比 (%)		11.0		8.6		10.5
乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )		1.6		1.1		1.5
乾燥質量 (g)		25218.8		5640.4		30859.1
土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )		2.700		2.733		2.706
間隙水体積 (cm <sup>3</sup> )		2764.4		483.4		3247.8
空隙体積 (cm <sup>3</sup> )		3795.3		2552.8		6348.3

図 3.3.3-1 に浸潤状況写真を示す。写真は、土槽のペレット側半分の観察窓の経時変化を示している。図から、底面から一次的に給水したところ、ペレット側に選択的に NaCl 水溶液が浸潤している状況が分かる。土槽上部までは 30 分程度で到達している。蒸留水の場合と異なるのは、NaCl 水溶液で間隙が満たされたペレットは、その場で膨潤するのではなく、崩れながら、一旦、土槽下部に沈殿しその後に膨潤している点である。さらに、蒸留水の場合と異なり、膨潤後のペレット部には空隙が再度発生するという現象が起きていない。このことは、一見、ペレットが NaCl 水溶液を給水して膨潤し、空隙をシールしているように見えるが、蒸留水の場合とは異なり、十分に膨潤しておらず、透水係数が大きいために給水が継続しているためであると考えられる。また、ペレット部の間隙は膨潤により 6 時間程度で満たされていることが分かる。また、ペレット部に供給されている NaCl 水溶液が、ブロックに対して側方からの NaCl 水溶液の供給源となっている状況も観察された。

ブロック部に対しては、下面のみならずペレット側からの NaCl 水溶液の供給により、浸潤面（浸潤に伴って色調が暗くなっている領域）が L 字型に進展している。土槽側面や上面からの浸潤状況もゆっくりではあるが進展しているため、NaCl 水溶液の給水が途絶えておらず、依然、供試体上面に水位が存在しているものと考えられる。100 日後には乾燥領域が目視で認識できなくなり、最終的にはブロック部分も全域で浸潤している状況が目視観察できた。

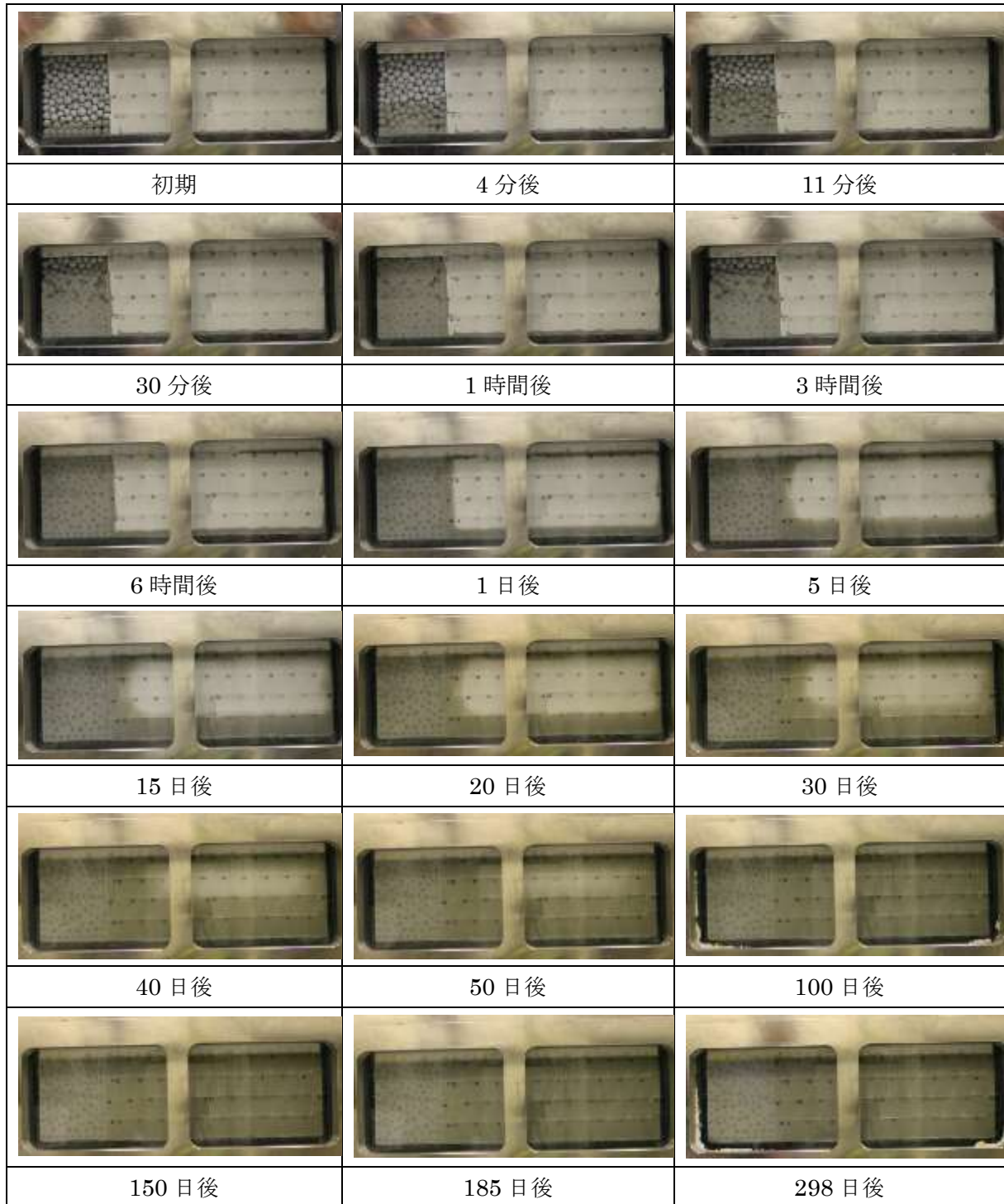


図 3.3.3-1 土槽規模試験による 2 次元浸潤試験 (0.5M-NaCl ブロック・ペレット併用ケース)

図 3.3.3-2 にはブロックとペレット併用ケースの比抵抗分布の変遷を、さらに図 3.3.3-3 にはブロックとペレット併用ケースの飽和度分布の変遷を示す。なお、図 3.3.3-2、図 3.3.3-3 では、土槽背面に設置されている電極の範囲 (土槽左端から 25mm~625 mm) が示されている。また、給水開始前に比抵抗計測を行い、比抵抗値が恒温恒湿チャンバー内 (室温 20℃、湿度 63%) で定常になるまで給水を待ったため、吸水開始時間よりも比抵抗の計測開始時間が 1 時間早くなって



いる。図から、試験開始直後にペレットが冠水し、給水面である底盤とペレット側からブロックに向かって水が浸潤している様子が分かる。ブロックでは、底盤とペレットから水が浸潤するため、飽和度は右上が最も小さく、左下が最も大きい傾向にある。また、比抵抗計測によると、概ね 80 日以降で全領域が飽和していることが分かる。これらの傾向は、図 3.3.3-1 に示した浸潤状況と整合している。

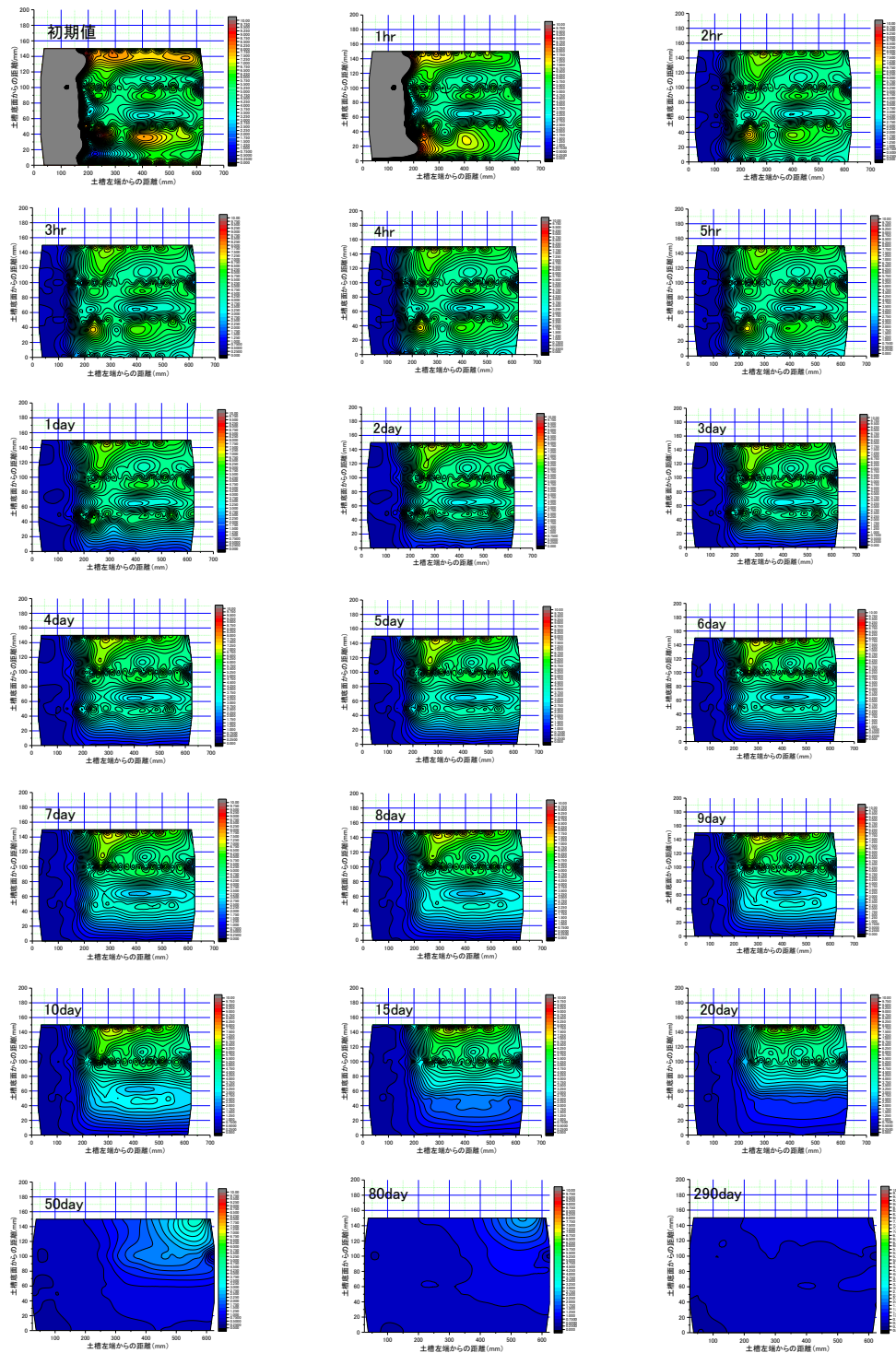


図 3.3.3-2 ブロックとペレット併用ケースの比抵抗分布の変遷 (0.5M-NaCl)



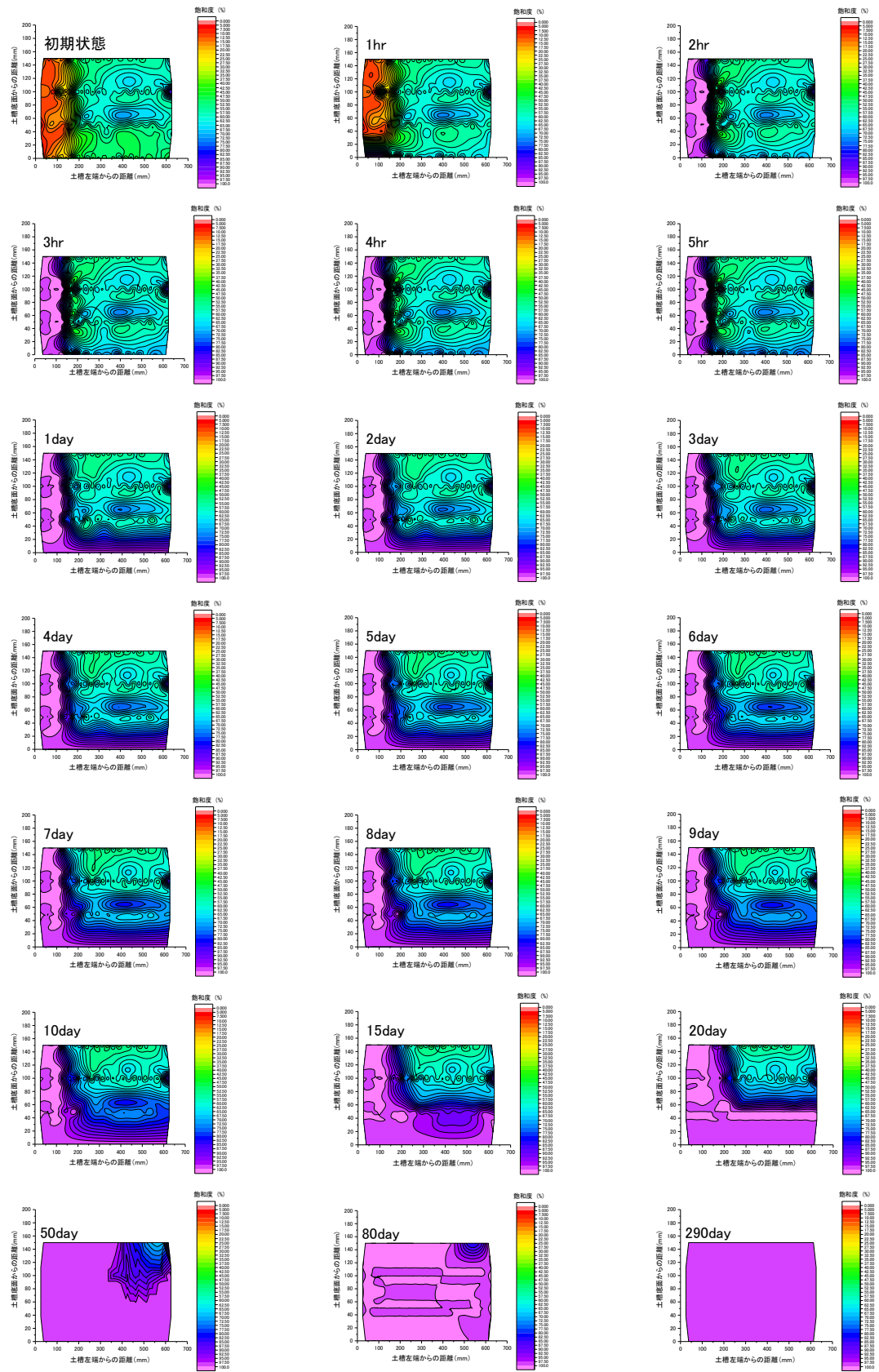


図 3.3.3-3 ブロックとペレット併用ケースの飽和度分布の変遷 (0.5M-NaCl)

図 3.3.3-4 には、ブロックとペレット併用ケースの給水量の経時変化を示す。給水初期の状況を分かりやすくするために時間の対数軸に対して給水量の経時変化を示している。図から、給水開始から 1 時間は給水量が急激に増加するが、1 時間以降は、流量は小さくなり、給水量は漸増している。これは、一旦、ペレット部分の大間隙を満たした NaCl 水溶液がベントナイトに吸水されるまでは給水量が増加するが、それ以降はペレットやブロックの界面付近の飽和度が增加するため、給水量が低下したものと考えられる。給水量が、その後土槽の空隙体積に達したのは 92 日程度であった。この結果は、目視観察や比抵抗計測結果と一致している。

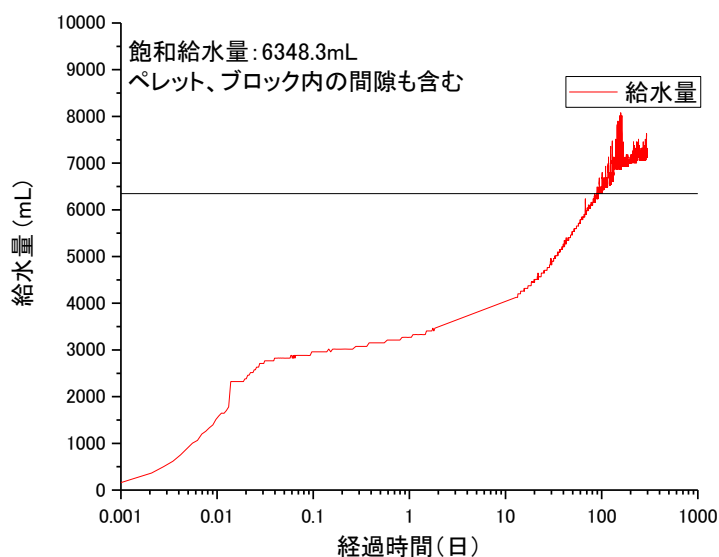


図 3.3.3-4 ブロックとペレット併用ケースの給水量の経時変化

図 3.3.3-5 には、土槽上面に配置した 14 個のロードセルで計測した膨潤圧の経時変化を示す。ロードセルの初期値は、ロードセルを反力盤の役割も兼ねている土槽の上蓋と供試体との間に挟み込んだ際の設置圧である。土槽の右端に行くほど設置圧が高い傾向を示している。

図から、ペレットが充填されている範囲が土槽左端から 175mm であるため、それよりも左側のロードセルに関しては給水後、ロードセルの値が急激に低下している。これは給水に伴うコラプスが発生したためだと考えられる。一方、ブロック側のロードセルは、設置圧の大きなブロックは給水に伴うコラプスで応力が低下しているが、設置圧が比較的小さなブロックは給水に伴って膨潤圧が増加傾向を示している。この傾向が進めば、膨潤圧分布は均一化の方向に向かうものと考えられる。

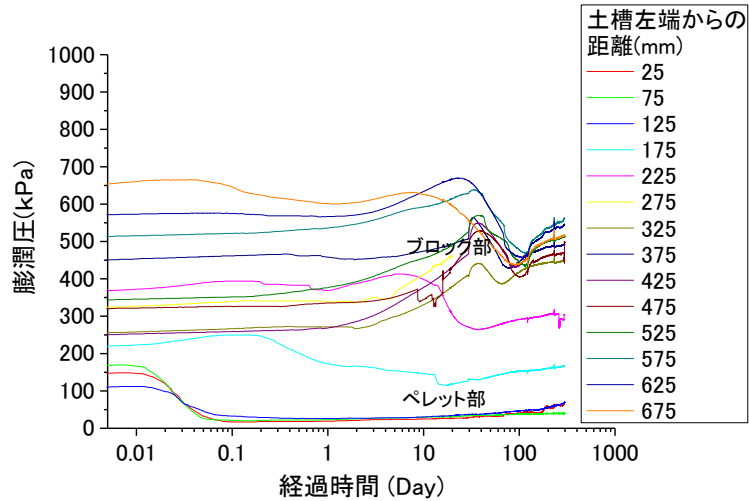


図 3.3.3-5 ブロックとペレット併用ケースの膨潤圧の経時変化

図 3.3.3-6 には、ロードセルで計測した膨潤圧分布の変遷を示す。図から、ペレット領域の膨潤圧は給水開始から 0.2 時間を最大として、それ以降は低下傾向を示している。またその分布はほぼ一定値である。一方、ブロック側の膨潤圧分布は、初期設置圧の影響により、土槽の右端に向かって大きくなる傾向を示していることが分かる。この傾向は給水時間経過に伴って解消される傾向を示しており、最終的には、ブロック部においては概ね均一な膨潤圧分布に至っている。ただし、大局的には、若干土槽左側のペレット部から右上がりに膨潤圧の増加傾向は残っている。この傾向は、ペレット部分に向かって膨潤したブロックの密度が低下していることに起因するものと考えられる。

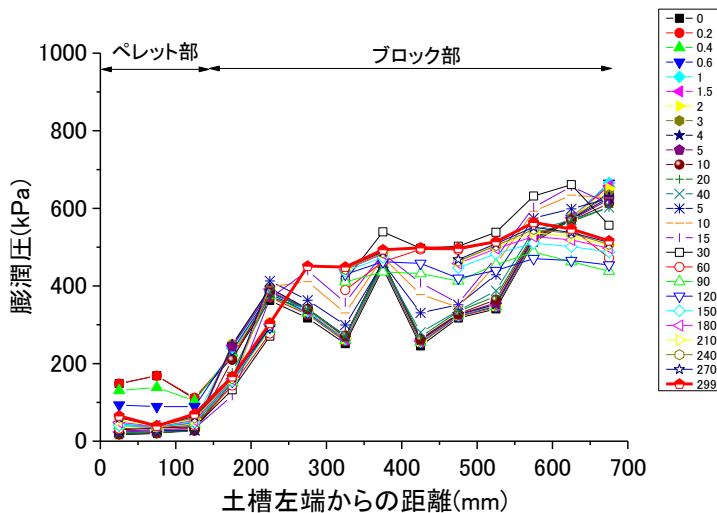


図 3.3.3-6 ブロックとペレット併用ケースの膨潤圧分布の変遷

図 3.3.3-7 に土槽解体時の状況を示す。写真から、供試体上面にはペレットの隙間やブロックの隙間の位置が目視で判断できる。これは、マリオット管の水位管理を供試体の初期高さに合わせてあった為、十分に給水されなかったためであると考えられる。しかしながら、供試体内部では

密実に膨潤しており、解体時にペレットやブロックの隙間で剥離することはなかった。

図 3.3.3-8 に示した解体した供試体から、土槽が十分に飽和していない結果となった。これは、給水停止から解体までにある程度の時間を要したことによる乾燥やアクリル面側の繋ぎ目からの漏水などが考えられる。実際に、図 3.3.3-1 に示した写真では、アクリル面の覗き窓の縁に NaCl の析出物が観察されている。しかしながら、本試験では、比抵抗電極による計測結果と給水量と空隙体積の関係や目視観察結果が概ね整合していることから、試験期間中は十分に飽和しているものと考えられる。解体作業中、供試体が乾燥しないように図 3.3.3-7 に示したように極力ラップするなどの対策を講じているが、ある程度乾燥することは致し方ないと思われる。解体によって正確な飽和度を取得するためには、高湿度のチャンバーなどでの解体や迅速なコアリングなど更なる対策を講じる必要がある。



図 3.3.3-7 解体時の状況

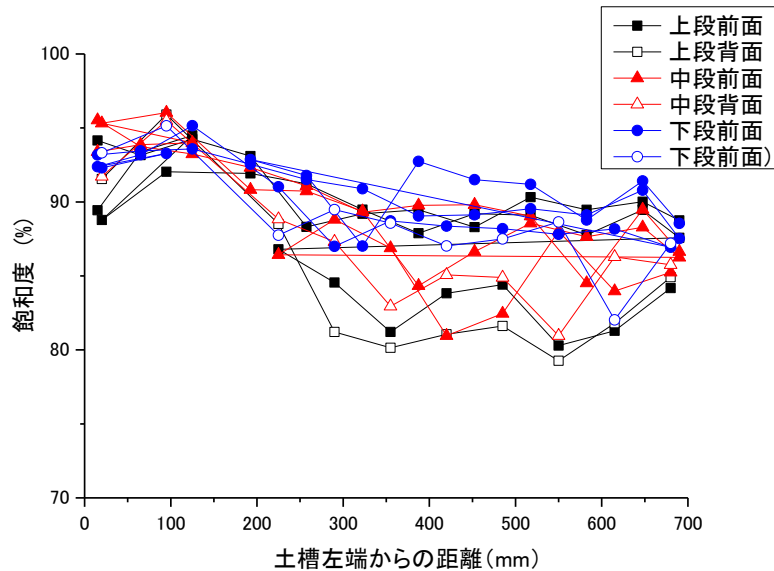
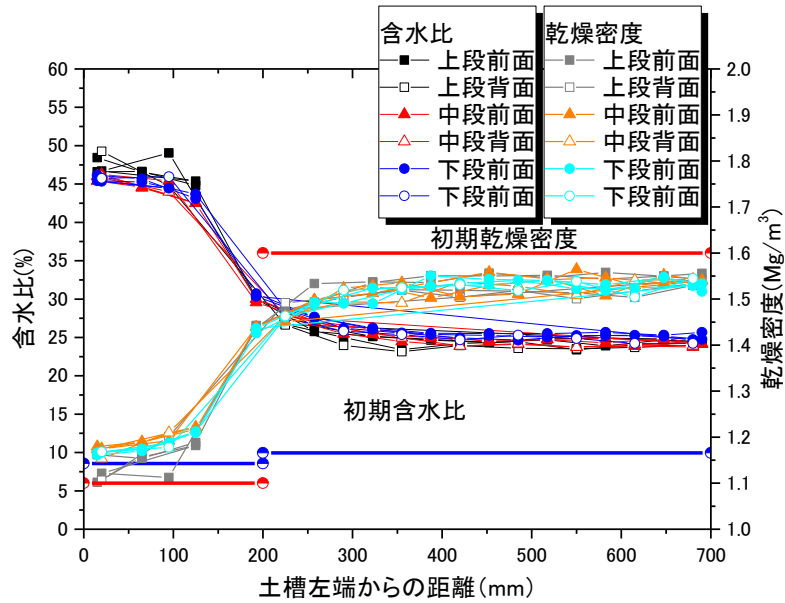


図 3.3.3-8 ブロックとペレット併用ケースの解体結果

### 3.4 浸潤による間隙空気の移行試験

#### 3.4.1 目的と概要

前述の土槽試験によるブロック定置工法を模擬した緩衝材の浸潤試験において、地下水は緩衝材と非膨潤性材料の界面を選択的に浸潤して、その後に緩衝材の深部へ浸潤するという傾向が分かった。この際、ブロックの内部には飽和した緩衝材に囲まれて行き場がなくなった間隙空気が存在し、浸潤した地下水に溶存するか、水圧の分布によっては浮力によって上方向に移動し、そ

の際に緩衝材を破過する可能性も否定できない。

そこで本試験では、図 3.4.1-1 に示す緩衝材の一次元浸潤速度試験において、地下水が緩衝材に下から上に向かって一次的に浸潤する現象を精度良く評価することができた試験装置を用いて、トラップされた空気が地下水の浸潤挙動に及ぼす影響を試験によって検討する。前述(3.1 項)の一次元浸潤速度試験では、地下水浸潤に伴う間隙空気圧の増加が地下水浸潤速度に影響を及ぼさないように供試体上端を大気圧解放条件としていた。しかしながら、実際の処分場における地下水の浸潤状況を想定すると、浸潤に伴って間隙空気が緩衝材内部にトラップされ、緩衝材の均一な飽和を阻害する可能性が考えられる。そこで、本試験では、間隙空気が緩衝材内部にトラップされた場合を想定し、上下から給水して地下水浸潤を模擬し、セル中央で間隙空気圧変動を制御・計測する。さらに地下水浸潤挙動は一次元浸潤速度試験と同様に比抵抗変化で計測する。これにより、緩衝材の浸潤挙動へ与える影響を室内試験によって定量的に評価する。

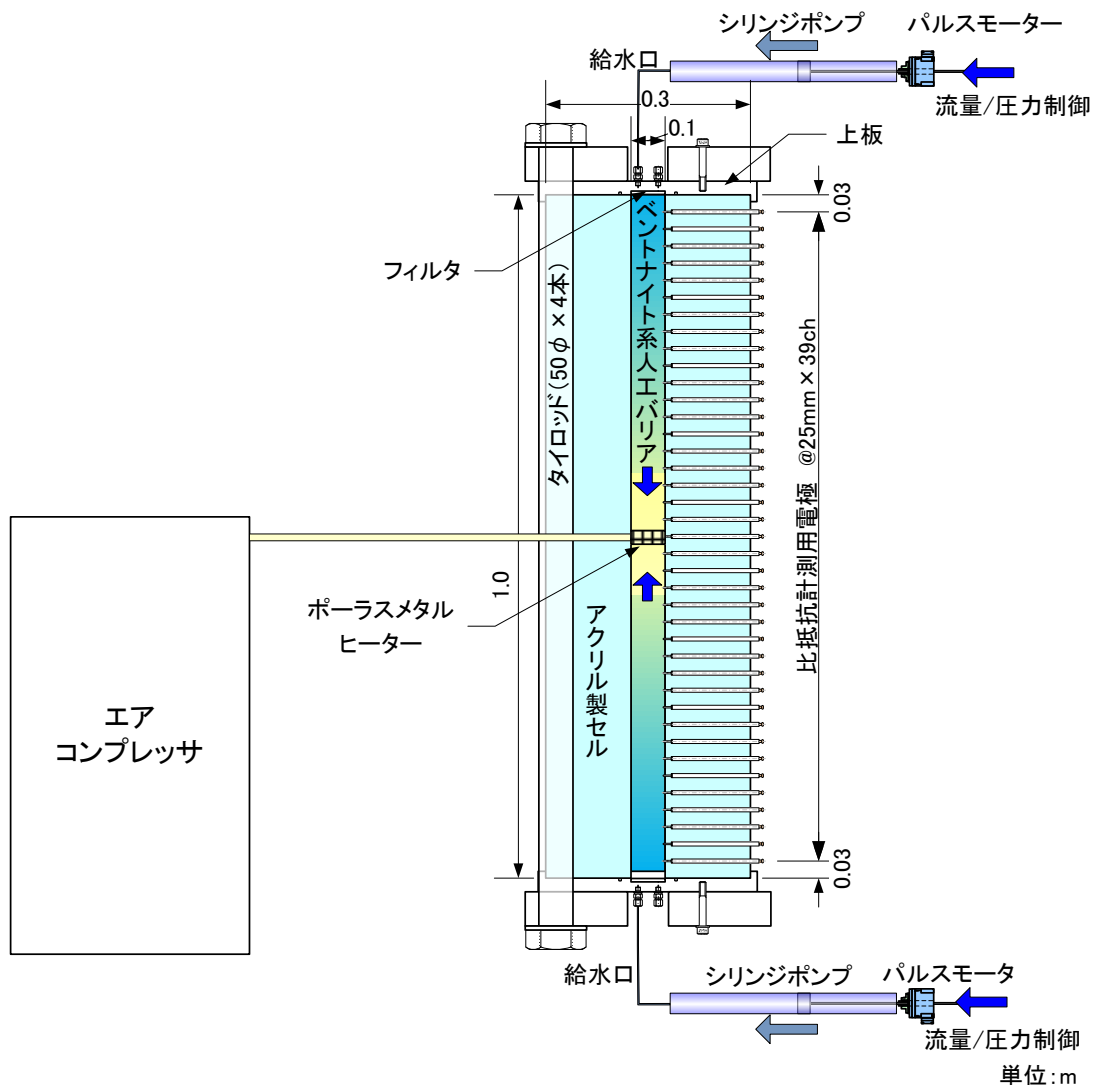


図 3.4.1-1 浸潤による間隙空気の移行試験 (イメージ図)



### 3.4.2 試験方法

#### (1) 緩衝材の製作方法

試験に用いる緩衝材の製作には、緩衝材の含水比のばらつきによる不均一な密度分布が試験に影響しないように、凍結混合法を採用し、表 3.4.2-1 に示す材料仕様を満足するように供試体を作成した。

供試体の作製においては、仕上がり層圧が 5mm となるように撒き出して、200 回程度静的に締固め、乾燥密度が均質になるようにした。但し、供試体中央付近には間隙空気計測・制御用のポーラスメタルを配置するため、その分だけ緩衝材部分の高さは短くなっている。

#### (2) 浸潤による間隙空気の移行試験の手順

試験方法は、緩衝材の一次元浸潤試験（3.1 項）と同様に、浸潤状況を比抵抗値の変化として計測した。間隙空気が試験器内部にトラップされたり、供試体内を移行したりする現象も飽和度の変化を伴うため、比抵抗値の変化として計測される。

さらに、一定時間毎に、給水量、比抵抗分布、空気圧を測定した。表 3.4.2-1 に浸潤による間隙空気の移行試験のケースを示す。

表 3.4.2-1 浸潤による間隙空気の移行試験のケース

ベントナイト乾燥密度	初期含水比	液種	計測項目	備考
1.6Mg/m <sup>3</sup> (Na 型ケイ砂 30wt%混合)	10%	蒸留水	間隙空気圧 比抵抗値 流量 給水圧 空気圧	継続中

図 3.4.2-1 に浸潤による間隙空気の移行試験手順を示す。試験は、①まず、初期状態の比抵抗分布を計測した。次に、上下から蒸留水を 0.0001cc/min の流量一定で給水し、この間、適宜、比抵抗分布、間隙空気圧を計測した。ある程度の期間、給水圧の上昇や比抵抗分布から湿潤領域の形成がみられない場合には、流速を 5 倍にして再度試験を継続した。

②次に、給水圧が 100kPa 程度になった、若しくは比抵抗分布から膨潤領域が確認された時点で圧力制御に切り替えて浸潤速度を計測した。初期の通水圧は、流量制御時の通水圧の半分以下を基本としている。この際に、間隙空気に対して大気圧変動幅が有意にならないように 50kPa の背圧を付与した後にコックを閉じて封圧して間隙空気圧の変化を計測した。

③最後に、ある程度の浸潤領域が得られた時点で、間隙空気を高めて浸潤領域の変化を取得した。なお、この①～③の手順は、各試験段階で計測結果を確認の上、次の試験段階へ移行した。

図 3.4.2-2 には、浸潤による間隙空気の移行試験セルを示す。

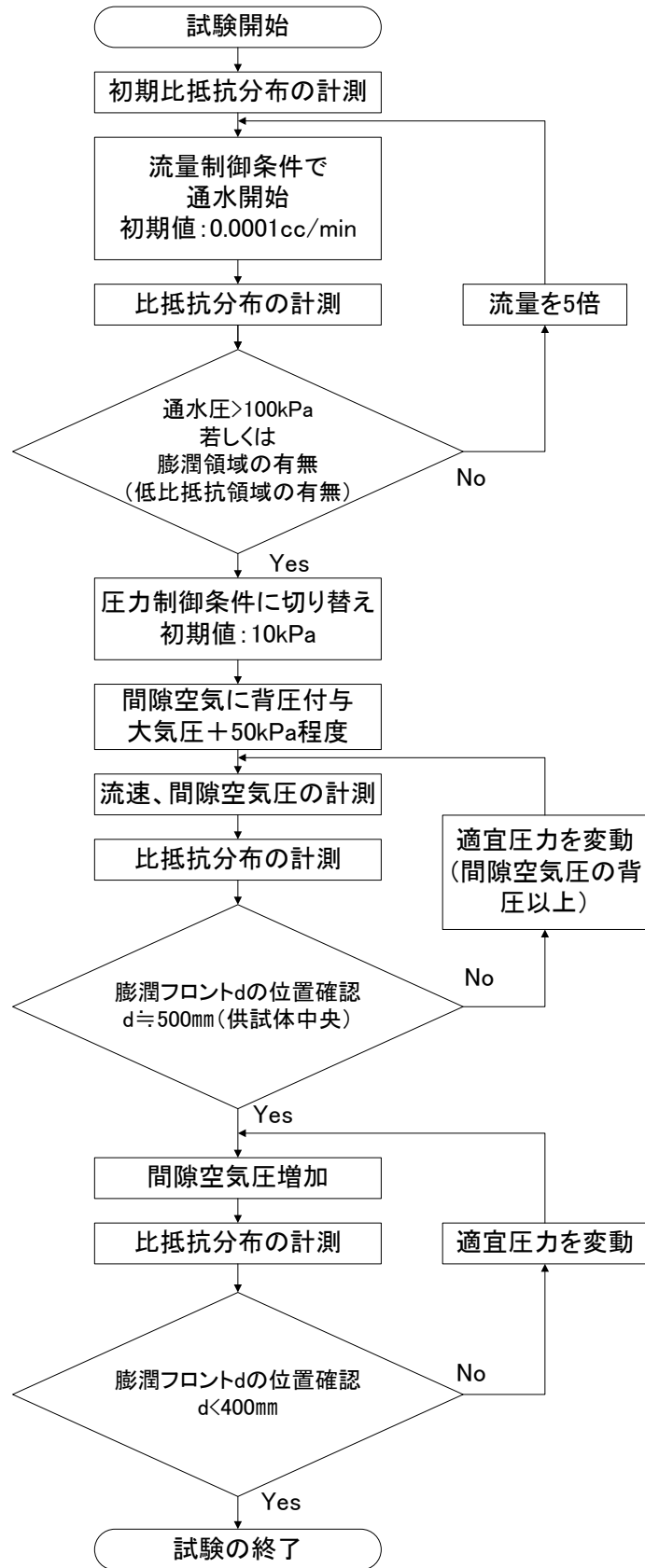


図 3.4.2-1 浸潤による間隙空気の移行試験手順



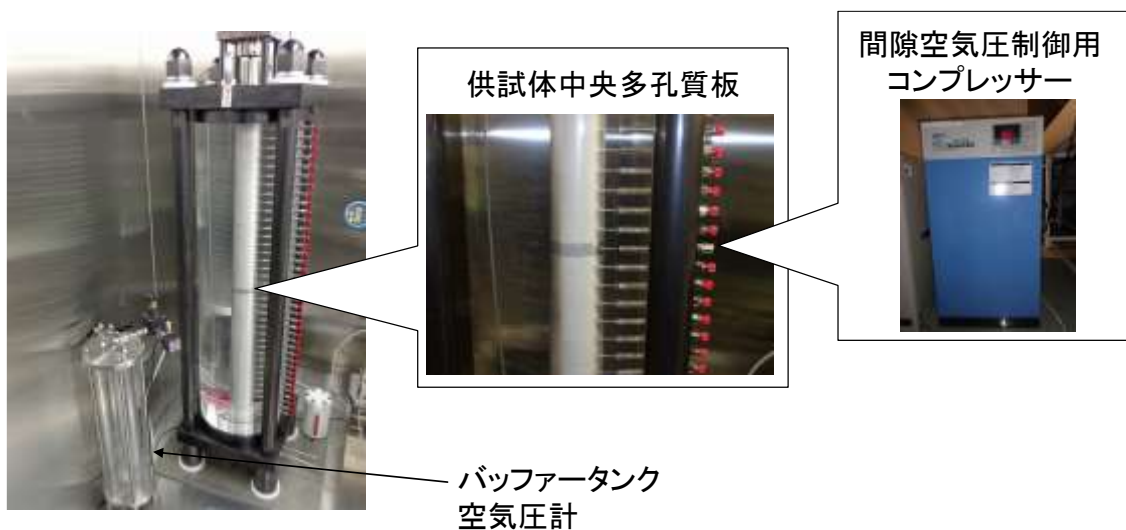


図 3.4.2-2 浸潤による間隙空気の移行試験セル

### 3.4.3 試験結果

#### (1) 流量制御過程

図 3.4.3-1 に給水圧の経時変化を示す。初期の給水速度  $0.0001\text{cc}/\text{min}$  に比べ自己拡散による吸水速度の方が速かったため、初期段階では給水圧がゼロ～負圧となっている。このため、給水速度を  $0.0005\text{cc}/\text{min}$  として流量制御で給水を継続した。この結果、供試体下部への給水圧は漸増傾向を示した。一方、供試体上部は、給水速度を  $0.0005\text{cc}/\text{min}$  に増加させても、依然として給水圧が負圧であった。これは、図 3.4.3-2 に示すように、供試体上部と下部での浸潤状況の差異があるためと考えられる。すなわち、供試体の下部では、供給水の水面が上昇して、その水面が供試体と接して初めての給水が開始される。一旦、給水が始まると、常に一次的に給水がなされる。一方、供試体の上部では、給水速度が非常に小さいために滴水として供試体に給水がなされる。供試体に到達した水は三次元的に供試体の深部に拡散するために供試体端面で常に不飽和状態となっていると考えられる。

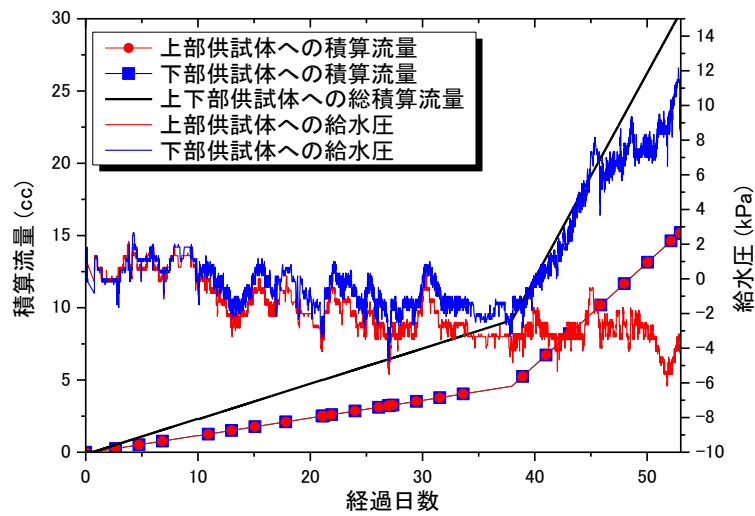


図 3.4.3-1 浸潤による間隙空気の移行試験における給水量と給水圧の経時変化

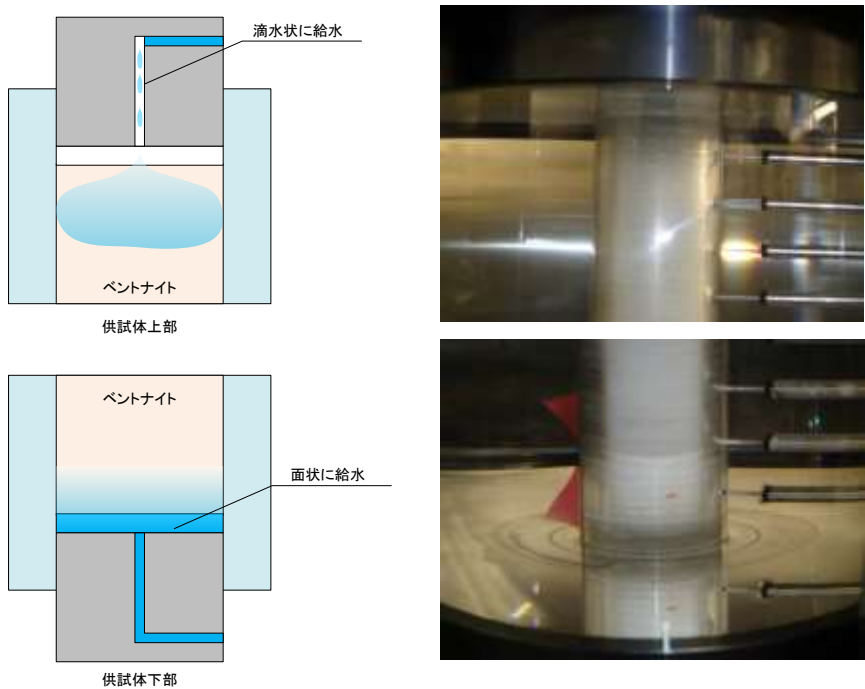


図 3.4.3-2 供試体上部と下部での給水状況の差異

図 3.4.3-3 には給水に伴う間隙空気圧の変化を示している。図には、大気圧変動も併せて示している。図から、間隙空気圧の変動と大気圧の変動が同期しており、変動要因が大気圧変動であることが分かる。よって、試験の初期段階では、給水による空隙体積の減少に伴う間隙空気圧の増加、間隙水への間隙空気の溶解による間隙空気圧の減少などの現象はほとんど発生していないものと考えられる。

また、本試験結果より、浸潤による間隙空気圧の変化量に対して大気圧変動の大きさが有意で

あると試験結果の傾向を判断する際に差し障る可能性があることが分かった。このため、後述する圧力制御過程では、大気圧変動に影響されない圧力計として絶対圧計を採用した。

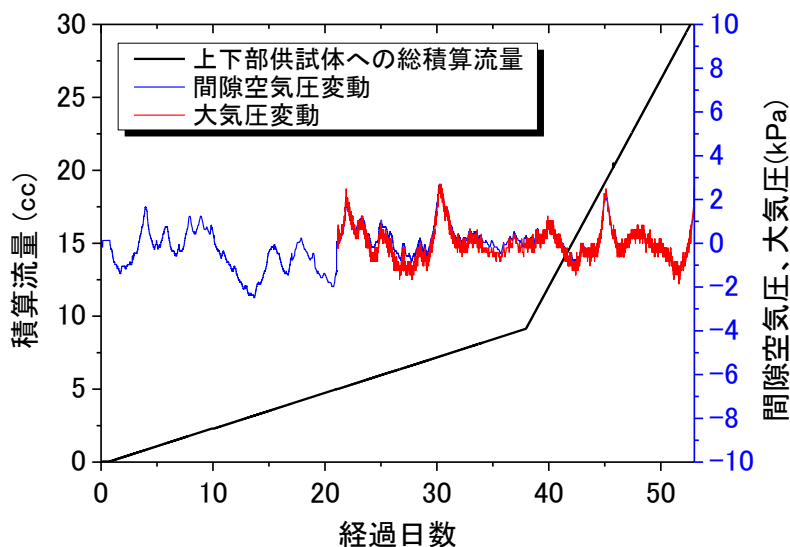


図 3.4.3-3 浸潤による間隙空気の移行試験における間隙空気圧と大気圧の経時変化

図 3.4.3-4 には給水に伴う膨潤圧の変化を示している。図から、膨潤圧は、0.6MPa 程度の値で収束傾向にあることが分かる。この値は、既往の研究[5]における同じベントナイト系人工バリア材料の同密度での膨潤圧試験結果の平衡膨潤圧と同等である。

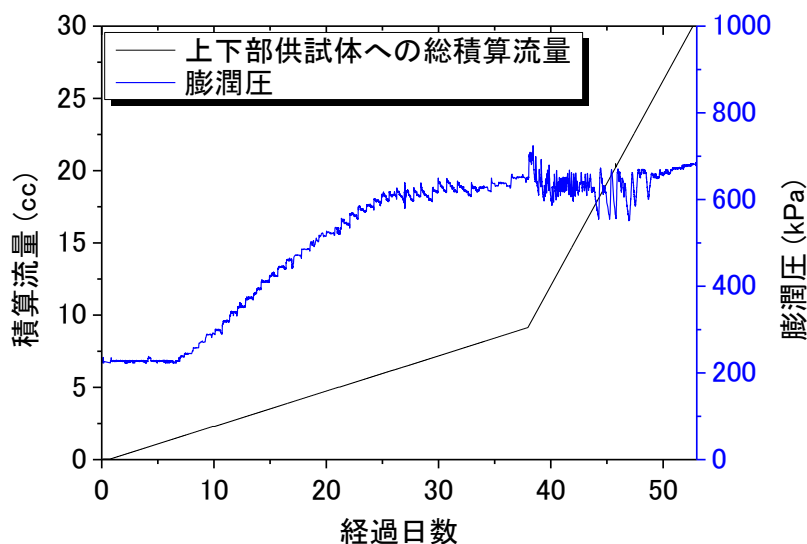


図 3.4.3-4 浸潤による間隙空気の移行試験における流量と膨潤圧の経時変化

図 3.4.3-5 には、給水に伴う比抵抗変化を示している。給水開始から 1 か月程度経過した時点で供試体上部において比抵抗値の低下が発生し、50 日後には、比抵抗値の低下領域が供試体上端から 250mm 程度まで進展しているのに対して、供試体下部では、比抵抗値の低下が給水開始か

ら 50 日程度まで発生しておらず、53 日経過後によりやく比抵抗値の低下が確認できた。これらの違いも、前述の給水状況の差異によるものと考えられる。すなわち、供試体上部では滴水状に給水されるため、浸潤領域が半径方向に狭く、深度方向に深くなる傾向が予想されるのに対して、供試体下部では、半径方向に広く深度方向に浅くなる傾向が予想される。

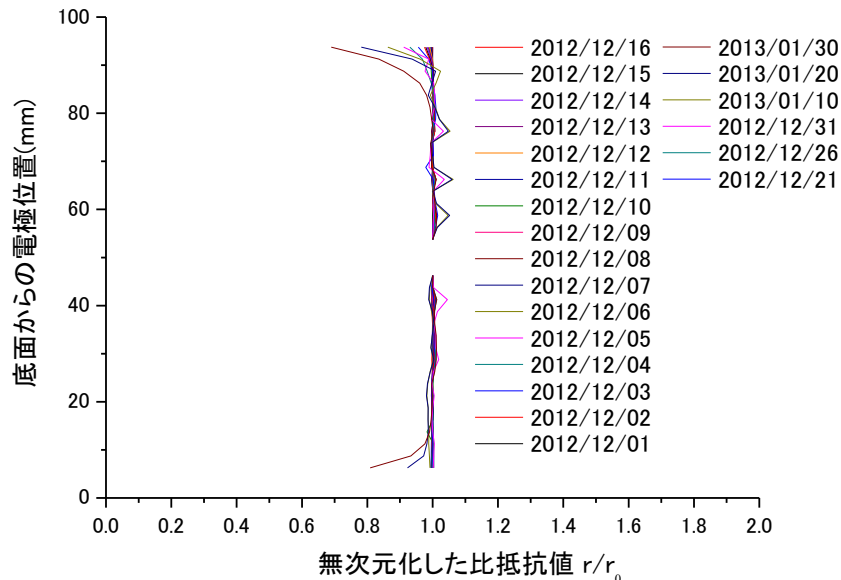


図 3.4.3-5 浸潤による間隙空気の移行試験における比抵抗分布（流量制御過程）

## (2) 圧力制御過程

前述のように、下部供試体に関しては給水に伴って給水圧が増加傾向を示しており、圧力制御への切り替えることが可能な段階と判断された。一方、上部供試体に関しては、下部供試体と同じ流量を供給したのにも拘らず、一向に給水圧が増加する傾向がみられなかった。これは前述のように、供試体上部と下部での浸潤状況が異なることに起因すると考えられる。よって、供試体上下部で同じ供給量で制御しても、両方でそれぞれ適切な通水圧が発生する流量を決定することは難しいものと考えられる。一方、比抵抗分布に着目すると、50 日目以降では供試体の上下端に比抵抗の低下領域が形成されており、給水の浸潤に伴う膨潤領域の存在が予想された。そこで、通水開始から 53 日目に圧力制御試験に切り替えた。上部供試体の給水圧が十分に増加していなかったことから、初期の給水圧を 10kPa として段階的に給水圧を増加させ、550 日目に 876kPa まで増加させた。この圧力制御過程では、前述のように圧力計として絶対圧計を採用している。この絶対圧計は、真空状態をゼロとした圧力計である、一般的な大気圧をゼロとしたゲージ圧計よりも 1 気圧（約 101.3kPa）分だけ低く表示される。876kPa はゲージ圧計では約 1MPa に相当する。

図 3.4.3-6 に圧力制御に変更した後の給水圧と給水量の経時変化を示している。図から、流量制御から圧力制御に変更しても給水速度は大きく変化していないことが分かる。このことから、破過などの現象が発生しておらず、供試体の上下面には飽和領域が形成されていることが予想される。また、図には膨潤圧を全応力表示と有効応力表示の両方で示している。図から、全応力の膨潤圧は、給水圧の増加に伴って、増加する傾向を示している。全応力の膨潤圧から、給水圧を

減じた有効応力表示の膨潤圧に着目すると、給水圧を増加させると有効応力表示の膨潤圧は減少傾向を示している。これは、給水圧の増加分の全てが全応力の増加に寄与しているのではなく、そのうちの幾らかは供試体内部への浸潤や摩擦などによって消費されているものと考えられる。

図 3.4.3-7 には、試験初期段階における大気圧と間隙空気圧の経時変化を示している。間隙空気圧が大気圧変動と同期しており、その変動幅が非常に大きいため浸潤に伴う間隙空気の変動傾向を読み取ることができない。そこで、圧力制御に移行時に、間隙空気圧に 50kPa の背圧を空気圧として与え、さらに圧力計を絶対圧計に変更した。これにより、大気圧変動による間隙空気圧の変動を抑制できていることが分かる。

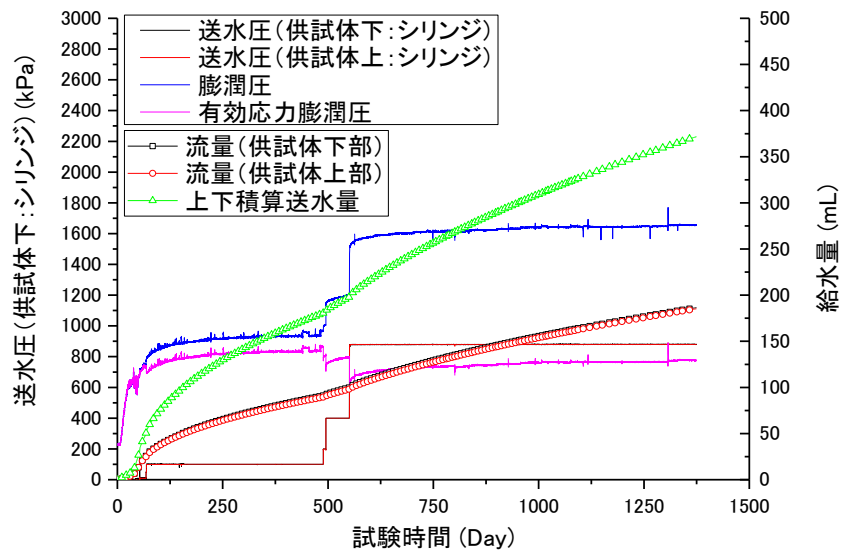


図 3.4.3-6 給水圧と給水量の経時変化 (圧力制御過程)

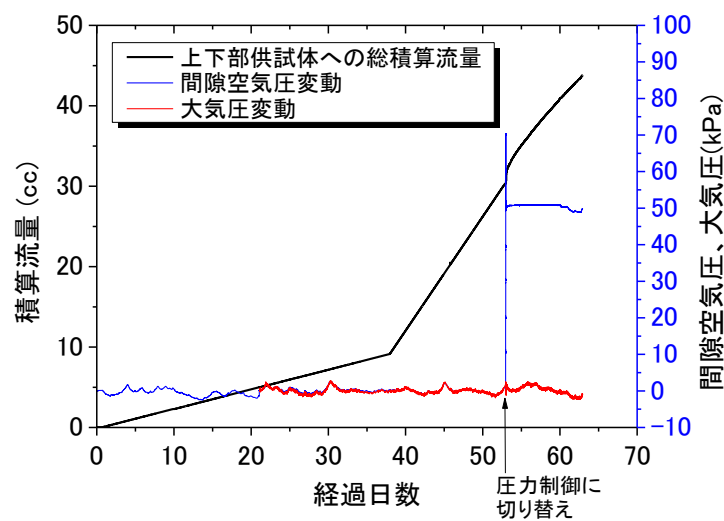


図 3.4.3-7 間隙空気圧と大気圧の経時変化 (試験初期段階)

図 3.4.3-8 には、背圧適用後の間隙空気圧と大気圧の経時変化を示す。図から、給水圧が低い段階では、背圧を維持することができずに、背圧が減少傾向を示した。これは、間隙水の毛細管現象による拡散の速度の方が給水速度よりも速く、間隙空気を閉じ込めるある程度の厚さのある飽和領域を形成できなかったためだと考えられる。しかしながら、給水圧を 876kPa まで増加させると、減少傾向であった間隙空気圧が増加に転じた。その後、間隙空気圧は、約 2 年間で 3kPa 程度、一定勾配で増加した。

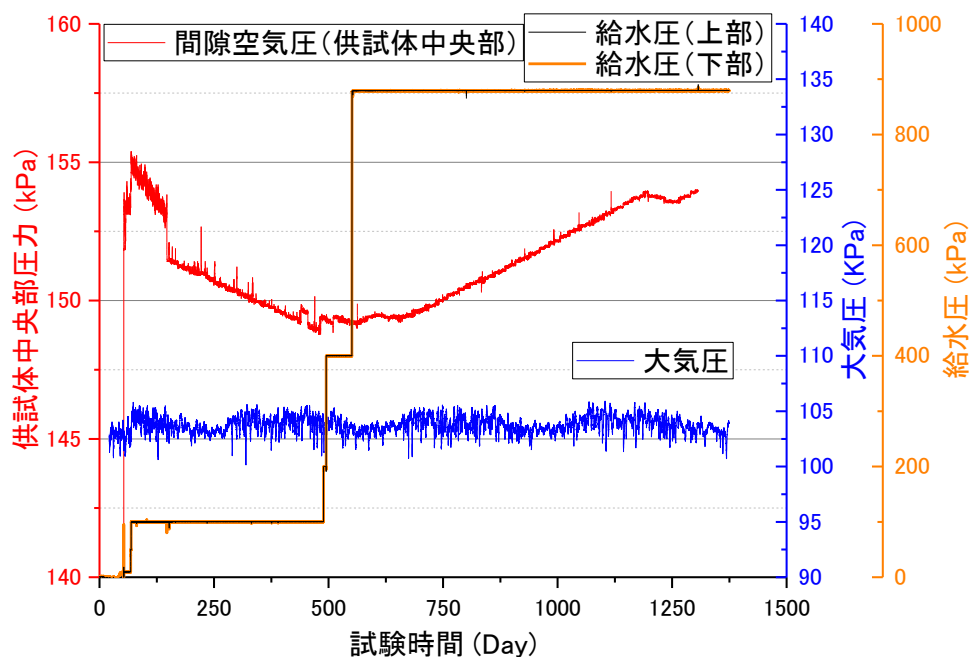


図 3.4.3-8 間隙空気圧と大気圧の経時変化（背圧適用後、圧力制御過程）

図 3.4.3-9 には、間隙空気圧と給水速度の経時変化を示している。図に示すように、給水圧を 876kPa まで増加させた直後から給水速度は漸減しているが、間隙空気圧が漸減している期間に比べて、その値は安定している。このことから、供試体への物質移動の収支が、給水と間隙水への間隙空気の溶存のみで決まり、不規則な間隙空気の移動などが生じていないものと考えられる。

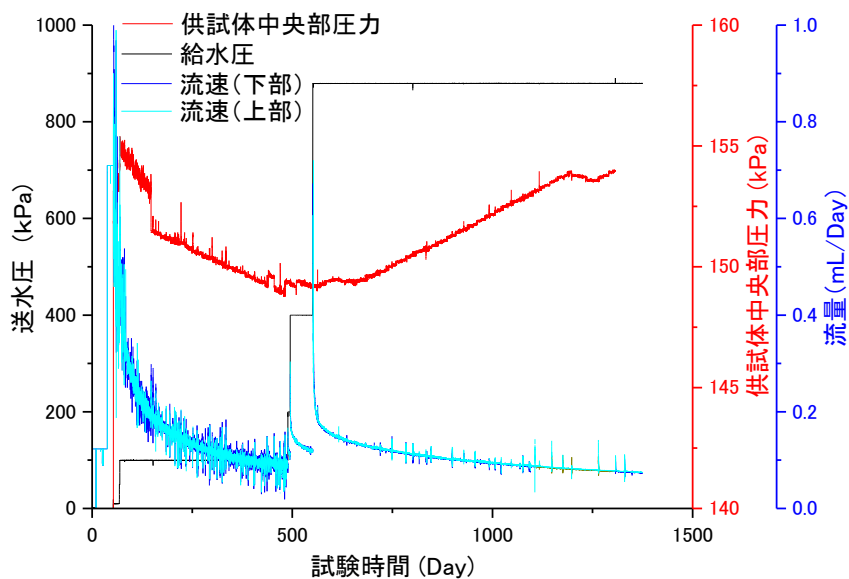


図 3.4.3-9 間隙空気圧と給水速度の経時変化（背圧適用後、圧力制御過程）

図 3.4.3-10 には、圧力制御に変更したのちの浸潤による間隙空気の移行試験における比抵抗分布を示している。さらに、図 3.4.3-11 には、比抵抗値から換算した飽和度分布を示す。図から、上部と下部はどちらも供試体の中心に向かってなだらかに飽和度が低下しており、最上下部の電極付近でも飽和度が 90%程度まで増加した。

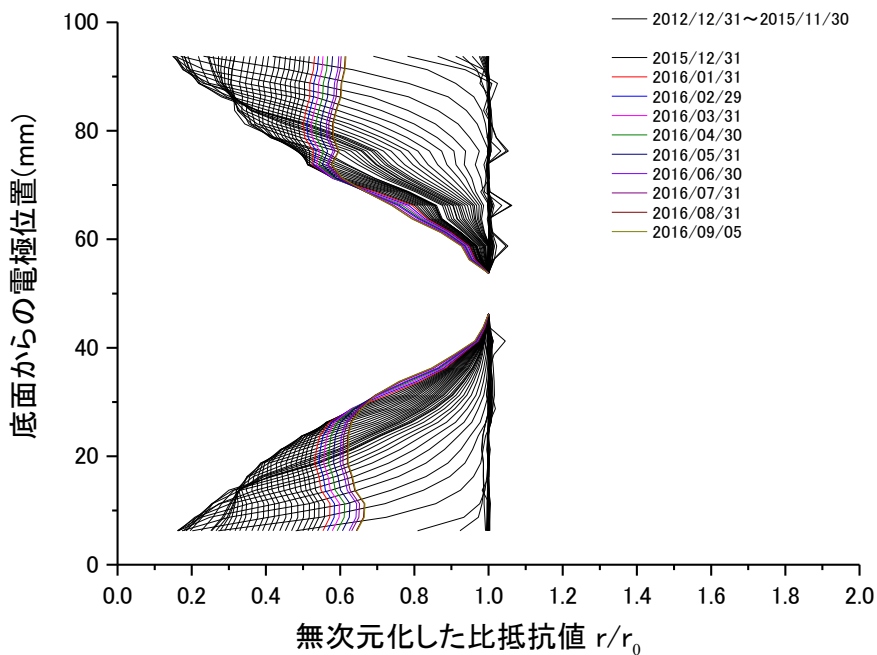


図 3.4.3-10 浸潤による間隙空気の移行試験における比抵抗分布（圧力制御過程）



しかしながら、平成 26 年以降は、上下面の比抵抗値が低下する傾向を示している。比抵抗値の低下は、乾燥密度が一定の場合、飽和度の低下を意味している。そのため、図 3.4.3-11 に示すように飽和度が低下する傾向として算出されている。しかしながら、仮に浸潤の進行に伴う供試体中央部の膨潤により、供試体の上下端面が圧縮され、乾燥密度が増加したという可能性も否定できない。この場合、飽和度が 100% で一定であったとすると、乾燥密度は比抵抗値と乾燥密度の関係から、 $1.76 \sim 1.79 \text{Mg/m}^3$  まで増加したことになる。乾燥密度  $1.8 \text{Mg/m}^3$  のクニゲル V1 単体の膨潤圧が、小林ら [6] に示された完全飽和線から  $1.42 \text{MPa}$  程度であり、上下端面に作用している圧力が全応力の膨潤圧として  $1.6 \text{MPa}$  程度であることから、圧密による乾燥密度増加が発生する可能性がある。

その一方で、供試体中央部に配置しているポーラスメタルにまで間隙水が浸潤し、電極の役割を果たしたため供試体全体で比抵抗値が変化した可能性も否めない。この場合、比抵抗計測用の電流が予期しない箇所を流れている可能性もあり、計測に影響をきたしている可能性もある。

今後、同様の試験を実施する場合には、素材の選定などに注意が必要である。

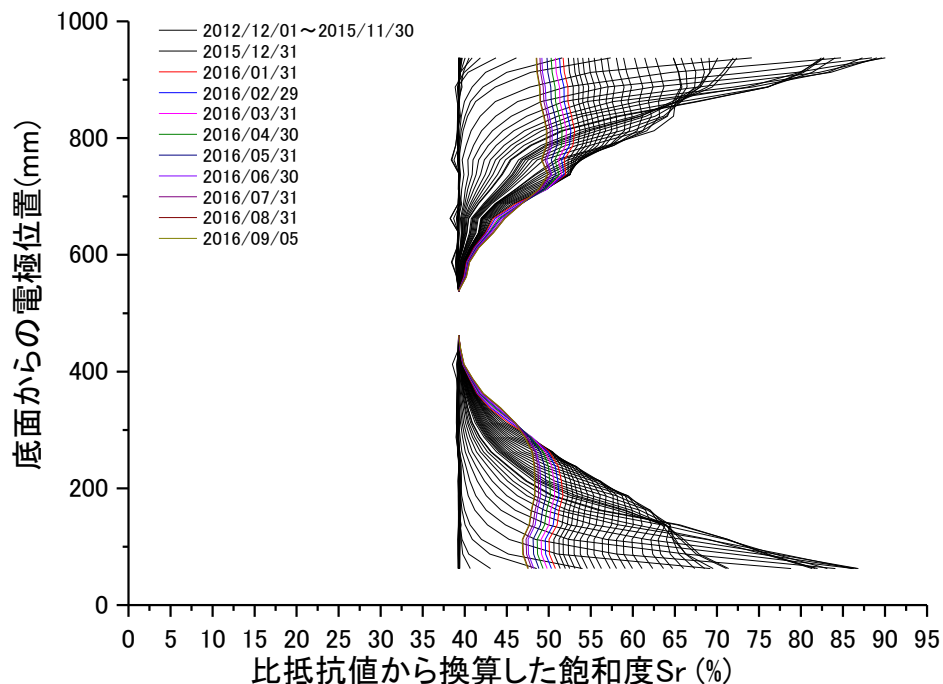


図 3.4.3-11 浸潤による間隙空気の移行試験における飽和度分布 (圧力制御過程)



### 第3章 参考文献

- [1] 鈴木英明, 藤田朝雄: 緩衝材の不飽和水理特性, 核燃料サイクル開発機構業務報告書, JNC-TN8430-99-010 (1999).
- [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)
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] (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 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 2 分冊) —人工バリア品質評価技術の開発— (2 / 2) (2011).
- [6] 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).

## 第4章 再冠水時の緩衝材の変質に関わる検討

### 4.1 Ca 型化が緩衝材に及ぼす影響の検討

#### 4.1.1 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の浸出液に含まれる 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る反応で、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、化学変質と飽和の事象の順番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。

#### 4.1.2 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  $2.733\text{Mg/m}^3$  程度であり、ケイ砂の土粒子密度は  $2.65\text{Mg/m}^3$  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  $\text{CaCl}_2$  水溶液で人為的に Ca 型化させたものを用いた[1]。

##### (2) 試験条件

試験ケースを表 4.1.2-1 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。表に示すように、概ね、計画通りの供試体が作製できていることが分かる。平成 26 年度まで実施していたケースを解体し、再現性確認のために同じ試験ケースを平成 27 年度から開始した。ただし、平成 26 年度まで実施していたケースでは、通水液を 2 回変更しているが、平成 27 年度から開始したケースでは 1 回だけ変更する計画である。そのため、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 4.1.2-1 Ca 型化可逆性確認試験条件

試験 Case	ベントナイト	乾燥密度 Mg/m <sup>3</sup>	有効ベントナイト乾燥密度 Mg/m <sup>3</sup>	CaCl <sub>2</sub> 水溶液濃度 mol/l	試験手順 (今後の予定も含む)	備考
1	Na 型 (ケイ砂 30wt%)	1.593	1.361	1	① 蒸留水で飽和後に、CaCl <sub>2</sub> 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。	解体
2		1.595	1.363		① 初期の不飽和状態で CaCl <sub>2</sub> 水溶液を通水する。 ② 平衡膨潤圧に達したら通水を蒸留水に交換する。 ③ CaCl <sub>2</sub> 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、化学分析*を実施。	解体
3	Ca 型化 (ケイ砂 30wt%)	1.595	1.363		① 初期の不飽和状態で CaCl <sub>2</sub> 水溶液を通水する。 ② 平衡膨潤圧に達したら通水を蒸留水に交換する。 ③ CaCl <sub>2</sub> 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、化学分析*を実施。	解体
1-2	Na 型 (ケイ砂 30wt%)	1.600	1.368		① 蒸留水で飽和後に、CaCl <sub>2</sub> 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。	再現性
2-2		1.600	1.368		① 初期の不飽和状態で CaCl <sub>2</sub> 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。	再現性
3-2	Ca 型化 (ケイ砂 30wt%)	1.600	1.368		① 初期の不飽和状態で CaCl <sub>2</sub> 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。	再現性

【土壤環境分析法第 V.7】に則り溶出陽イオン (Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>) 分析を実施、陽イオン交換容量 (CEC) も計測

### (3) 供試体作成方法及び試験方法

図 4.1.2-1 に示すような試験機を使用した。試験機を準備するに当たり、設定に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、排水は集水瓶で集めイオン分析する。
- 供試体は、乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup> のケイ砂 30wt% 混合 Na 型ベントナイトとケイ砂 30wt% 混合 Ca 型化ベントナイトであり、注水する液体は、1 mol/l の CaCl<sub>2</sub> 水溶液と蒸留水である。
- ケイ砂 30wt% 混合 Na 型ベントナイトに CaCl<sub>2</sub> 水溶液を適用すると、膨潤しながら Ca 型化が生じるが、ケイ砂 30wt% 混合 Ca 型化ベントナイトに CaCl<sub>2</sub> 水溶液を通水しても何も変質は生じない。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<sub>2</sub> 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 4.1.2-2 参照)。
- 全てのケースで平衡状態になった時点で、通水を蒸留水のケースは CaCl<sub>2</sub> 水溶液に、CaCl<sub>2</sub> 水溶液のケースは蒸留水に交換する。
- 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<sub>2</sub> 水溶液に切り替えるケースも実施する。このようにする事により、膨潤履歴の有無と 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 4.1.2-2 参照)。

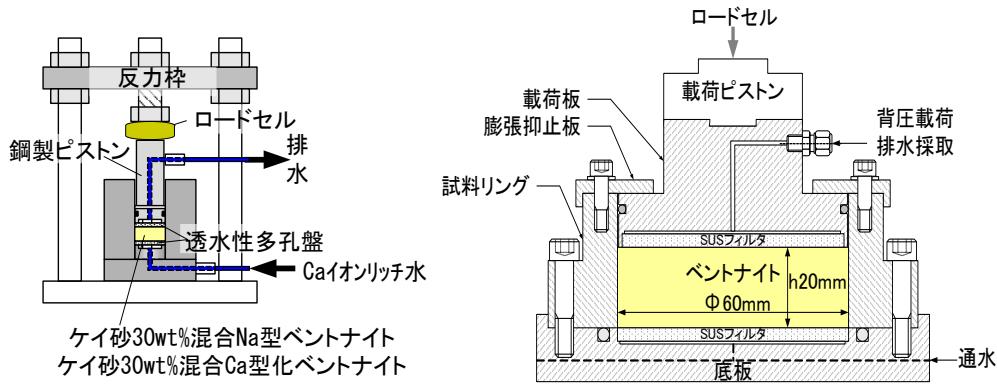


図 4.1.2-1 Ca 型化が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験の詳細図

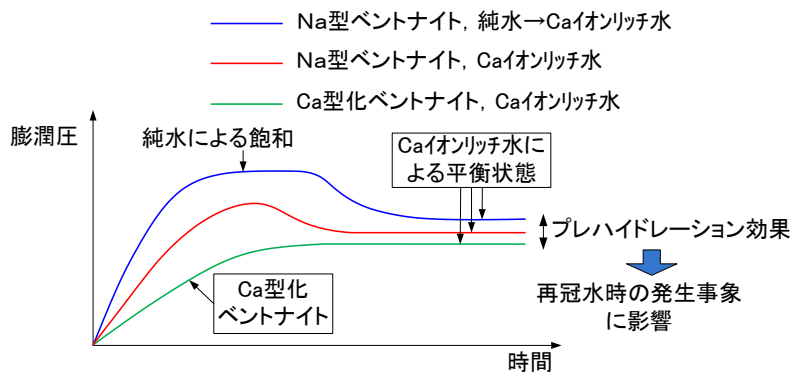


図 4.1.2-2 Ca 型化が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響のイメージ

#### 4.1.3 試験結果

試験 Case1~3 の結果[1]により、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とが分かった。その一方で、これまでの試験では、通水液を複雑に交換したり、Case 1 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。そこで、同じ条件で再現性確認を開始した。表 4.1.3-1 に供試体諸元を示す。

Case1-2 のみ飽和後に  $\text{CaCl}_2$  水溶液に交換する。また、全ての試験で 0.1MPa の通水圧を作用させることとした。

表 4.1.3-1 Ca 型化可逆性確認試験の供試体諸元

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

図 4.1.3-1 に膨潤圧と給水圧の経時変化を示す。前述の先行試験では、一部の試験ケースのみ加圧給水を行ったが、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 Case1-2~3-2 では全てのケースで 0.1MPa の圧力で給水している。この際に、有効応力としての膨潤圧は低下しているが、これは給水圧を間隙水圧として計測値から減じているからである。この加圧給水の結果、CaCl<sub>2</sub> 水溶液を用いたケースでは膨潤圧が定常状態に至っている。一方、蒸留水のケースでは、加圧給水後も膨潤圧が漸増している。現状では、蒸留水のケースの膨潤圧が CaCl<sub>2</sub> 水溶液を用いたケースに比べて、膨潤圧が最も低い。これは浸潤速度（飽和フロント）が遅いためであると考えられる。今後、試験が継続されれば、Case1~3[1]の試験と異なり、蒸留水のケースの膨潤圧が最大となる可能性がある。図 4.1.3-2 には給水量と給水圧の関係を示す。加圧給水によって、給水速度が増加していることが分かる。

表 4.1.3-2 には、給水した Ca イオンが全て Ca 型化に消費されたとして算出した場合の Ca 型化率を示している。現状では Case1 では蒸留水を給水しているため、Case2 (Na 型ベントナイトに CaCl<sub>2</sub> 水溶液を供給) でのみ Ca 型化が発生しているが、その Ca 型化率は 69%程度である。十分に Ca 型化するのを待って再現性の確認を行う予定である。

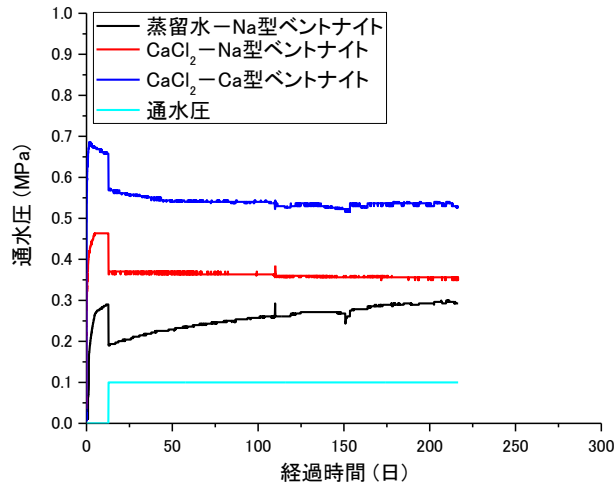


図 4.1.3-1 膨潤圧と給水圧の経時変化

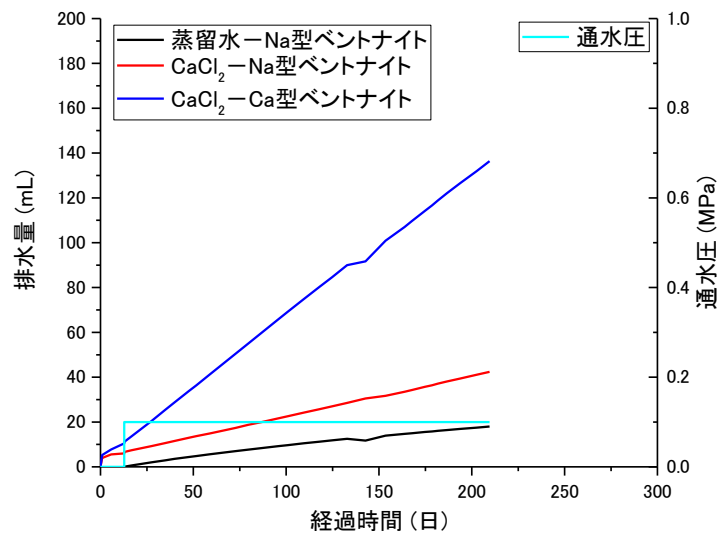


図 4.1.3-2 膨潤圧と給水量の経時変化

表 4.1.3-2 排水から算出した Ca 型化率

試験ケース	ケイ砂 30wt% 混合ベントナイト	乾燥密度 Mg/m <sup>3</sup>	有効ベントナイト 乾燥密度 Mg/m <sup>3</sup>	CaCl <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 給水量 (mL)	CaCl <sub>2</sub> の当量 (meq)	Ca 型化率 (%)
1-2	Na 型	1.593	1.361	0.333	64.2	40.66	0	0	0
2-2		1.595	1.363		64.2	40.66	42.4	28.2	69.4
3-2	Ca 型化	1.595	1.363		5.47	3.46	136.4	90.8	100

※ 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

## 4.2 鉄が緩衝材に及ぼす影響の検討

### 4.2.1 検討の目的

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[1]。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 4.2.1-1 参照)。体積拘束した緩衝材が膨潤することによって、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。この原因として、化学的な影響が考えられる。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ため、鋼製モールド近傍のベントナイトの性能が低下したことが予想される。緩衝材の膨潤効果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 型化したことが考えられるため、本試験で用いた緩衝材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 年にこのベントナイトを解体し、鋼製モールドに接する部分を採取したものを試料としてとして用いた。図 4.2.1-2 に採取の状況を示す。

また、この常温で 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についての分析を行った。ここでベントナイトと接触させた炭素鋼は、溶接した部分を含んだ炭素鋼の腐食試験のためのものである。炭素鋼の腐食に関する試験結果は本年度報告書第一分冊「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」に示す。

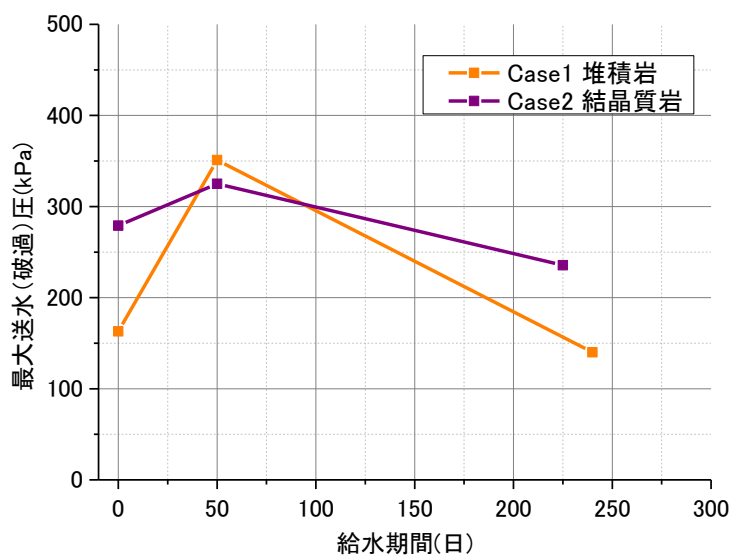


図 4.2.1-1 最大送水圧と給水期間の関係



図 4.2.1-2 ブロックサンプリングによる変質部の採取（両ブロック共に左側が底部）



#### 4.2.2 緩衝材化学変質に関する変質物質の分析

##### (1) 分析の目的

鉄と接触することによる緩衝材の変質挙動を表面分析、化学分析等により検討することを目的とする。分析対象とする試料は、前述の鋼製モールドに接触していたベントナイトである。鋼製モールドは湧水条件をモデル化するために、壁面に通水孔を設けている。結晶室岩を模擬した噴水状の湧水を想定し、3箇所の孔から0.1ℓ/minの湧水を生じさせる結晶質岩模擬ケース(A)と、堆積岩を模擬した面状の湧水を想定し、全27箇所の孔から0.1ℓ/minの湧水を生じさせる堆積岩模擬ケース(B)の2ケースについて試験を行った。表4.2.2-1に条件を、通水試験時の外観を図4.2.2-1に示す。それぞれのケースの試験後の鋼製モールドに接触していたベントナイトを分析対象試料とした。変質挙動の把握により、再冠水時の緩衝材の化学変質を考慮する必要性について検討するために分析を行った。

表 4.2.2-1 通水試験ケース

実験ケース	岩種	湧水条件	湧水箇所	湧水量
A	結晶質岩	噴水状湧水	3箇所	0.1 ℓ/min (湧水孔 1 箇所当たり 0.1/3 ℓ/min) 噴水状湧水
B	堆積岩	面状湧水	27箇所	0.1 ℓ/min (湧水孔 1 箇所当たり 0.1/27 ℓ/min) 面状湧水

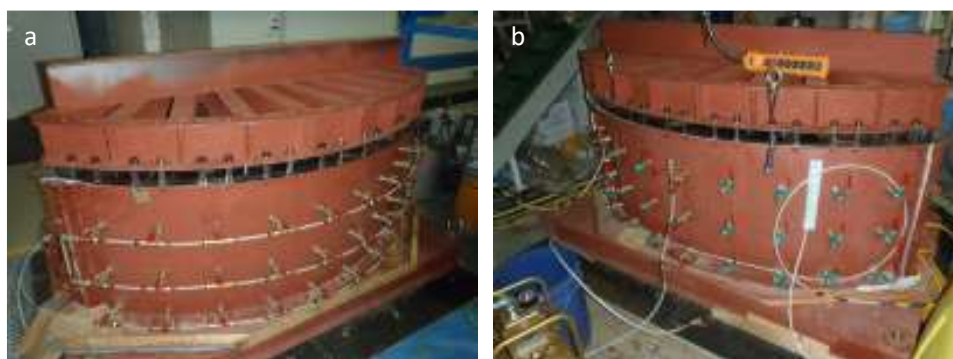


図 4.2.2-1 実規模模擬通水試験の外観(a: 結晶質岩模擬(A); b: 堆積岩模擬(B))

また、これと比較するために、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-ベントナイトの接触試料についての分析も合わせて行う。この試料は、本事業（「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）で、実施した浸漬期間は5年及び10年におよぶものである。ベントナイトはこれまでも本事業の試験で標準的に使用しているクニゲルV1にケイ砂を30%混合したものをを用いている。反応系の概念図と試験の様子を図4.2.2-2に示す。炭素鋼の腐食挙動の把握のための試験であったが、本年度10年目と5年目の試料を解体分析するにあたり、ベントナイトの分析も合わせて行うことは短期間、常温での変質との比較のみならず鉄-ベントナイト相互作用の把握のために非常に有意義である。

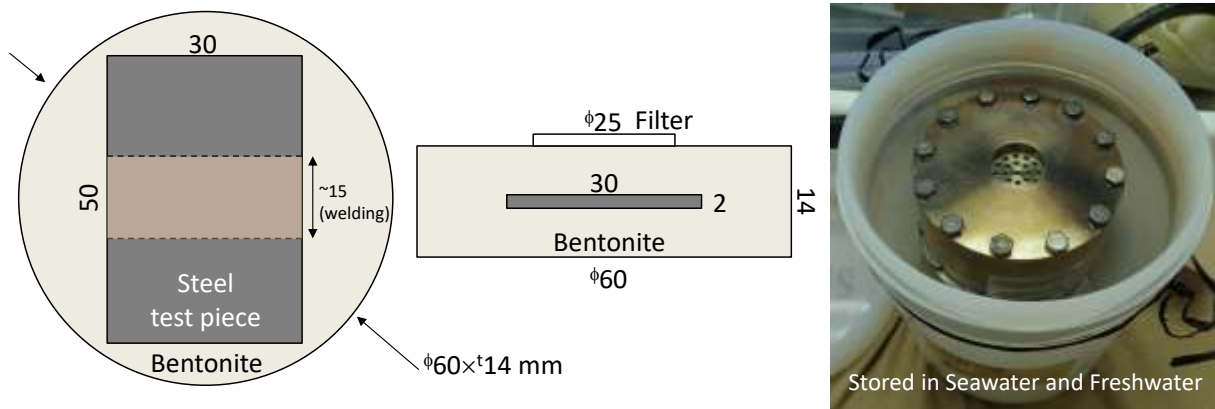


図 4.2.2-2 変質反応系の概念図と浸漬容器内の様子

ベントナイトはこれまでも本事業の試験で標準的に使用しているクニゲル V1 にケイ砂を 30%混合したものをを用いている。鉄との接触により、変質していることが予想されるため、鉱物的な変質、Fe 型化を分析により確認する。

これらの分析によって、再冠水時におこる変質の生成物を同定し、再冠水時の緩衝材の化学変質を考慮する必要性について検討する。

## (2) 分析方法

分析項目を表 4.2.2-2 に示す。各分析項目の測定及び分析の方法を以下に示す。各測定及び分析結果をもとに総合的な観点で各試料の変質状態を炭素鋼の分析結果も加えて比較検討し、鉄による緩衝材の化学変質に関する考察を行う。

表 4.2.2-2 分析項目

試料	試験方法	EPMA	FESEM-EDS	$\mu$ -XRD	XRD (湿度制御)	FETEM-EDS	層間陽イオン
A	結晶質岩模擬通水 (壁面の孔; 27 孔)	○	○	○	○	○	○
B	堆積岩模擬通水 (壁面の孔; 3 孔)	○	○	○	○	○	○
C	バッチ浸漬	○	○	○	○	○	—

## (3) 試料の前処理と分析手法

### 1) 通水試験後の試料

前項で述べた結晶質岩 (A-2) と堆積岩 (B-2) を模擬した通水試験後に回収した試料を分析するにあたり、試料を切り分け、真空乾燥処理を施した。前処理し、回収したベントナイト試料は表 4.2.2-3 に示す分析に供した。回収場所とそれらの適用分析手法について示す。

表 4.2.2-3 通水試験試料の回収場所と分析手法

試料 No.	試料 ID	回収場所 (mm)	分析手法
①,⑦	A-2	0-2	FESEM-EDS, 湿度制御 XRD, $\mu$ -XRD
②	A-2	2-4	FESEM-EDS
③	A-2	34.5-36.5	FESEM-EDS
④	B-2	0-2	FESEM-EDS
⑤	B-2	2-4	FESEM-EDS
⑥	B-2	38.5-40.5	FESEM-EDS
⑦	A-2 B-2	0-2	CEC

回収作業の手順を以下に示す。一連の試料調整作業は、大気中で実施した。図 4.2.2-3 から図 4.2.2-6 に、回収過程を写真で示す。EPMA 分析には、図 4.2.2-4 と図 4.2.2-6 下段中央に示したペトロポキシ樹脂含浸させてから鏡面研磨したものを供し、写真中の黄色の枠の範囲をマッピングした。



図 4.2.2-3 A-2 試料からの切断回収

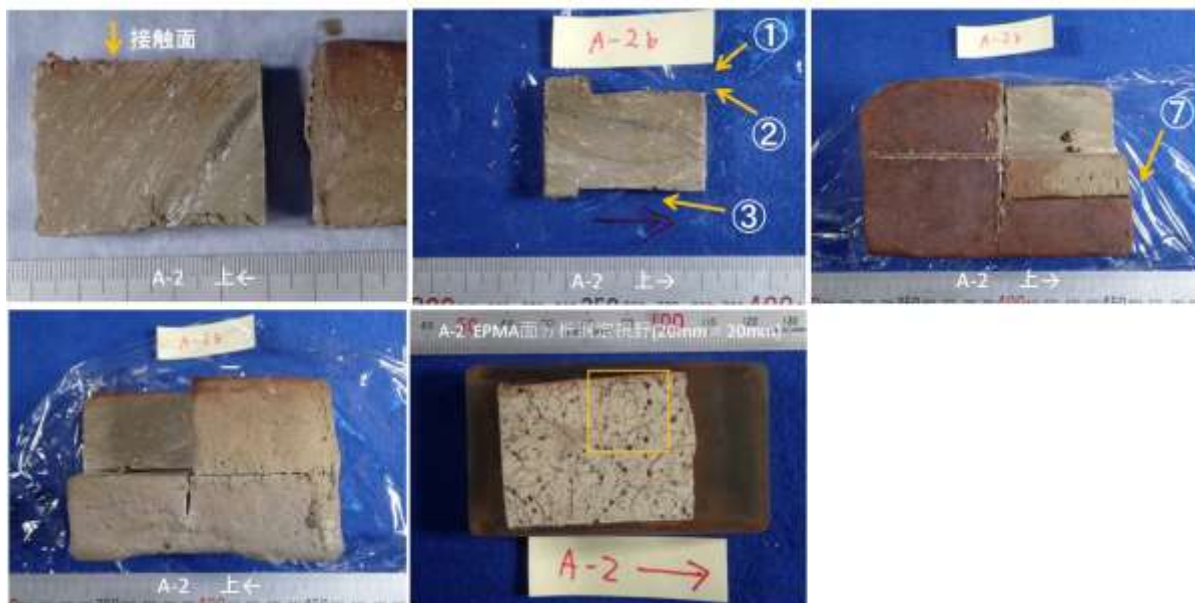


図 4.2.2-4 A-2 試料の切断回収からチップ回収と EPMA 分析用試料の樹脂包埋

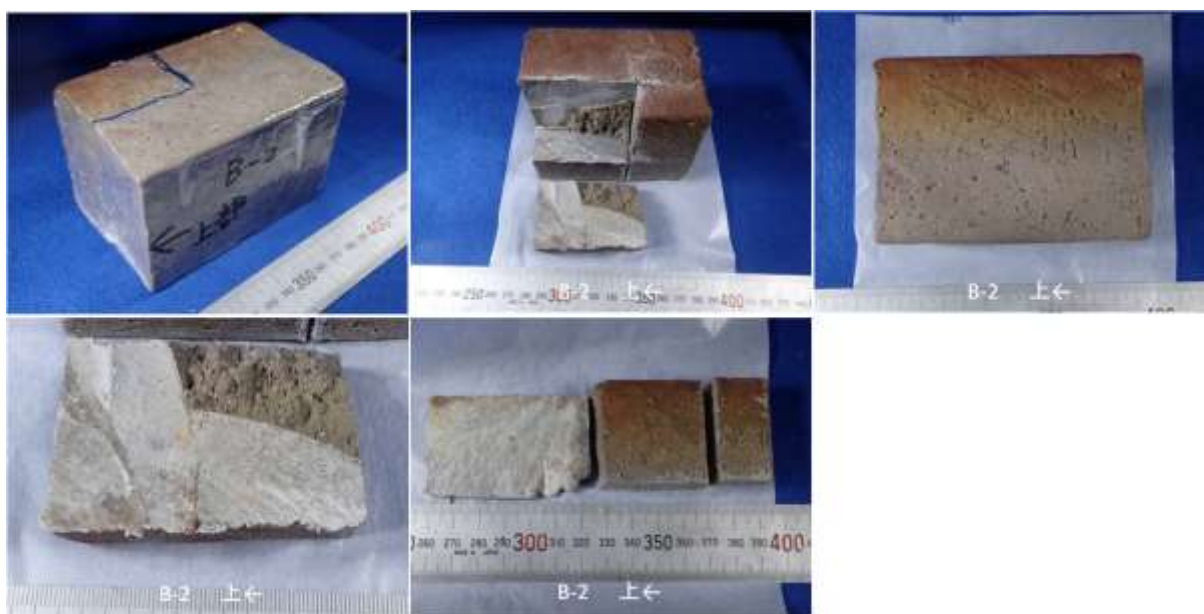


図 4.2.2-5 B-2 試料からの切断回収



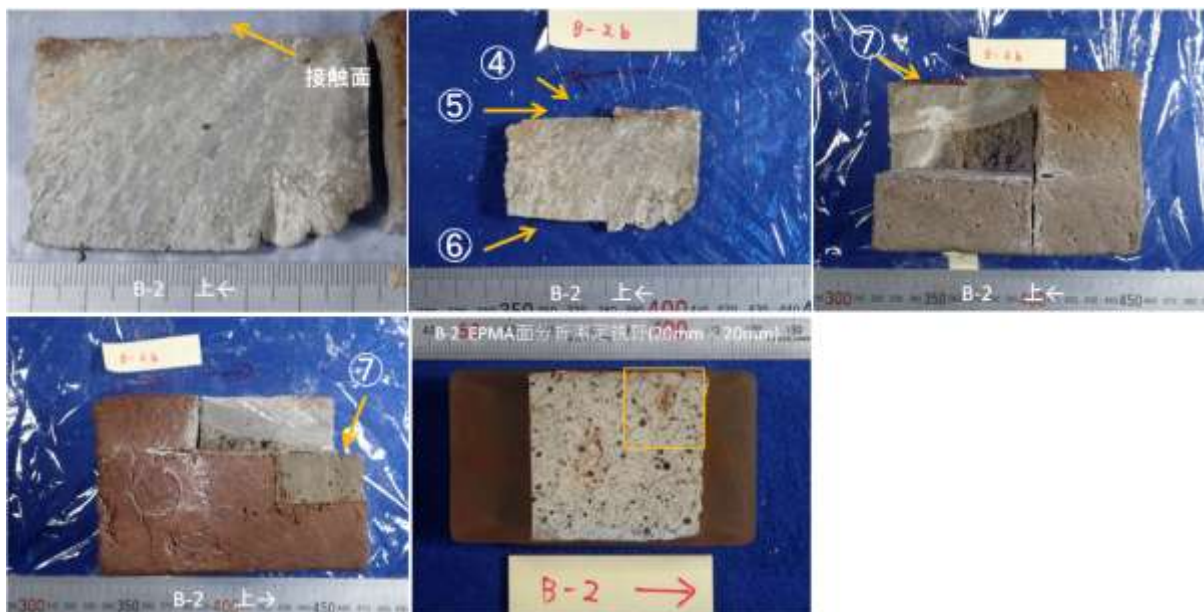


図 4.2.2-6 B-2 試料の切断回収からチップ回収と EPMA 分析用試料の樹脂包埋

## 2) バッチ浸漬試験後の試料

真空乾燥を行った試料は表 4.2.2-4 に示す分析に供した。回収場所とそれらの適用分析手法について示す。

表 4.2.2-4 ベントナイト試料の回収場所と分析手法

試料 No.	回収場所 (mm)	分析手法
①, ⑤	0-5	FESEM-EDS, 湿度制御 XRD, $\mu$ -XRD
②	5-10	FESEM-EDS, 湿度制御 XRD, $\mu$ -XRD
③	10-15	FESEM-EDS, 湿度制御 XRD, $\mu$ -XRD
④	15-20	FESEM-EDS, Wet-XRD, $\mu$ -XRD
⑥	0-15	TEM
⑦	15-30	TEM

浸漬試料は合計 10 試料あるが、その中で、代表的なものの前処理を図 4.2.2-7 に示す。

これらの試料はすべて炭素鋼接触部を含むもので、界面変質情報が薄まらないように、接触面から 2 mm 程度の厚さにとどめている。具体的な各試料のチップ回収場所は、写真に列記した。なお、チップ状の回収試料は数字①から⑦で示している。また炭素鋼と同サイズの領域を白枠で示しているが、伸長方向中央に引かれたラインは、接触界面を含む断面の EPMA

分析用試料としてシリコン型枠内でペトロポキシ樹脂含浸させたあとに切断した部分である。切断面は鏡面研磨した後、炭素蒸着して通常の EPMA 分析用試料として分析に供した。TEM (透過型電子顕微鏡、Transmission Electron Microscope) 分析については、試料をサンプリングしたのみで、今年度は分析しなかった。

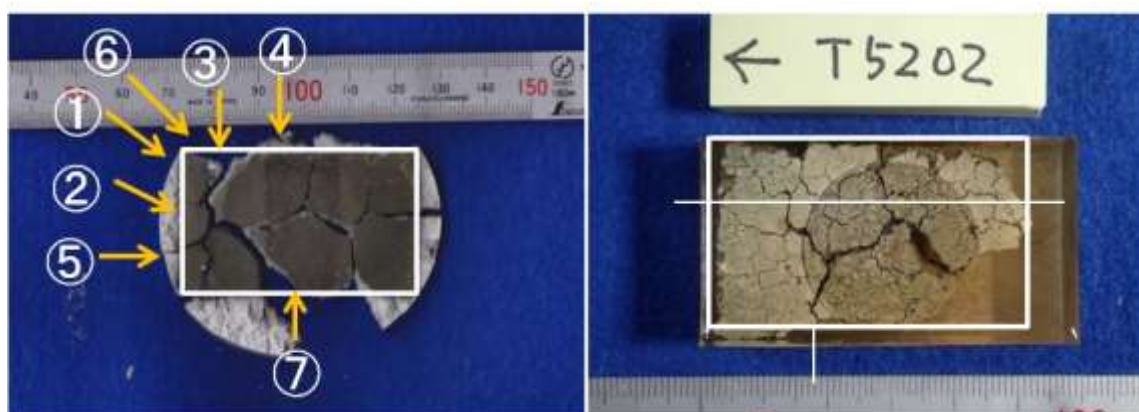


図 4.2.2-7 浸漬試料の前処理例  
(チップ回収場所と EPMA 分析断面を示す概観 (裏面が接触界面))

#### (4) EPMA 分析

##### 1) 分析方法

波長分散型電子線プローブマイクロアナライザー(EPMA, JXA-8200)により、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。試料の調整は、真空乾燥した回収試料をシリコ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 用に行う通常の炭素蒸着をベルジャー式真空蒸着装置を用いて行った。マッピング分析にける、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 Si, Al, Fe, Ni, Cr, Co, Cu, Mg, Ca, Na, K, S, Cl, O である。マッピングの実スキャン領域は 24x8 mm であり、これを 1000x1000 ピクセルで取得しているが、通水試験試料は、1000x1000 ピクセルで 20x20 mm の領域をスキャンした。バッチ浸漬試料は、縦横比は 3:1 の長方形ピクセル(1 ピクセルの実サイズは 24x8 μm)で、整数化するために、データ処理ソフト Image-J を用いて 2400x800 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とした。

また、マッピング測定後、通水試験試料に対しては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、深さ方法の元素濃度分布を得た。バッチ浸漬ベントナイト試料については、炭素鋼接触断面から内部までにおいて 2 ライン (母材部: Line1; 溶接部: Line2、1 ラインの幅は 100 ピクセル) の測定を行った。この測定の際は、加速電圧 15 kV、試料電流値は 12 nA とし、およそ 50-100 点程度の分析点とした。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）、SEI（電子像）、BEI（反射電子像）も示した。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鉱物組成とした。スメクタイトの化学組成は O = 22 に基づき計算した。

## 2) 通水試験後試料

### a 元素マッピング

元素マッピングの測定結果を図 4.2.2-8、及び図 4.2.2-9 に示す。

画面上、粒子状に見えるのはケイ砂である。また、亀裂が入っているのは、ベントナイトが乾燥時に収縮したためと考えられる。

Fe 以外の元素は、ケイ砂を除けばほぼ均一に分布していることがわかる。B-2 の Si が上下で濃度に差があるように見えるのは、ケイ砂も同様に濃度が高くなっているように見えることから、試料面の高さの違いによる影響だと考えられる。

Fe は、他の元素とは挙動が違っており、接触面（上部）の濃度が高くなっている。深さ方向の濃度分布は、マッピングのデータからは読み取れない。B-2 に関しては、接触面から離れたところにも不均一に Fe が分布しているように見える。ただし、試験後試料の変色部が約 5cm 程度であることに比べると、Fe の分布範囲は狭かった。変色が Fe の存在によるものだとしたら、発色の感度が非常に高いと考えられる。

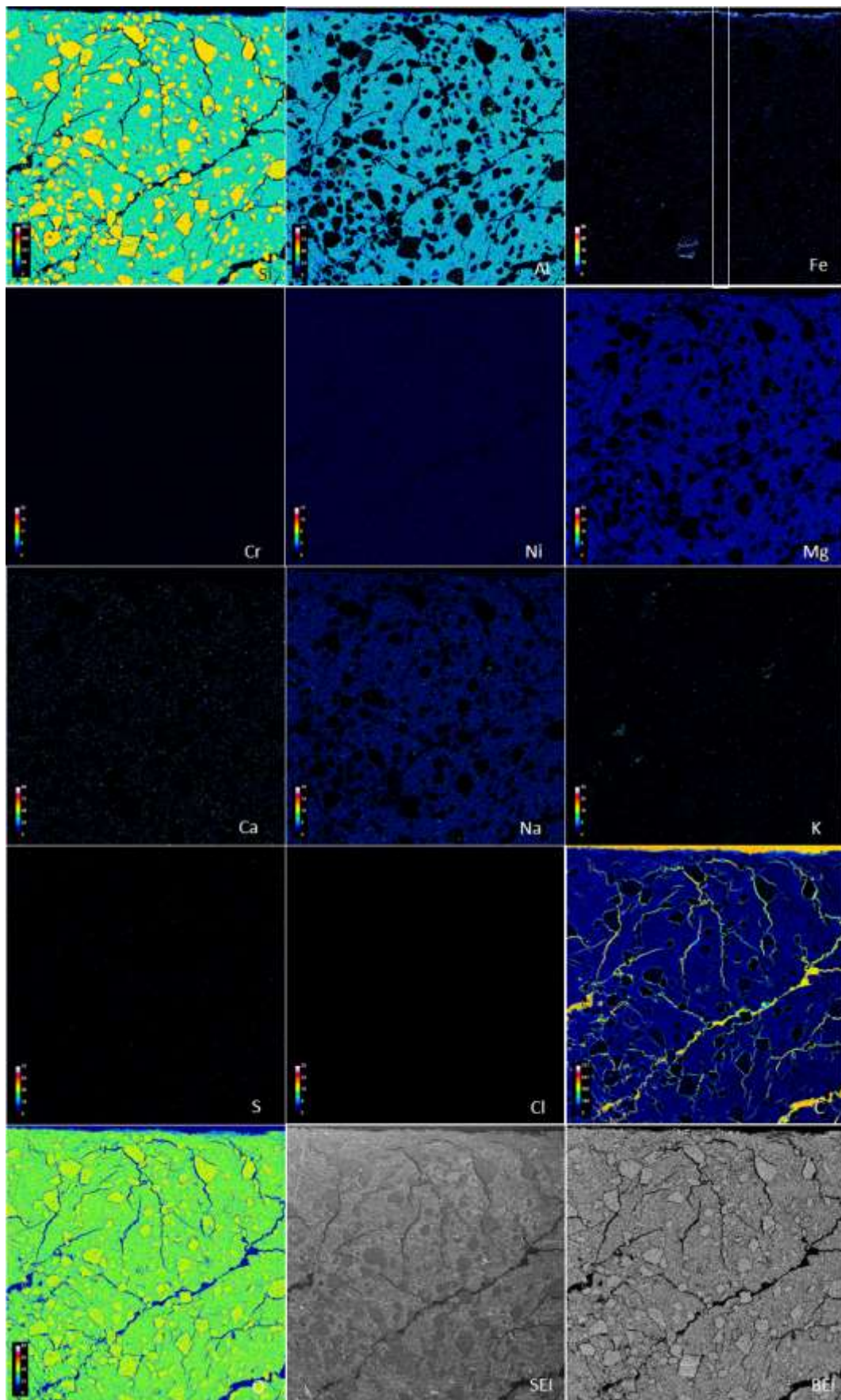


図 4.2.2-8 A-2 試料の元素マッピングデータ(xy スケールは 20x20 mm)



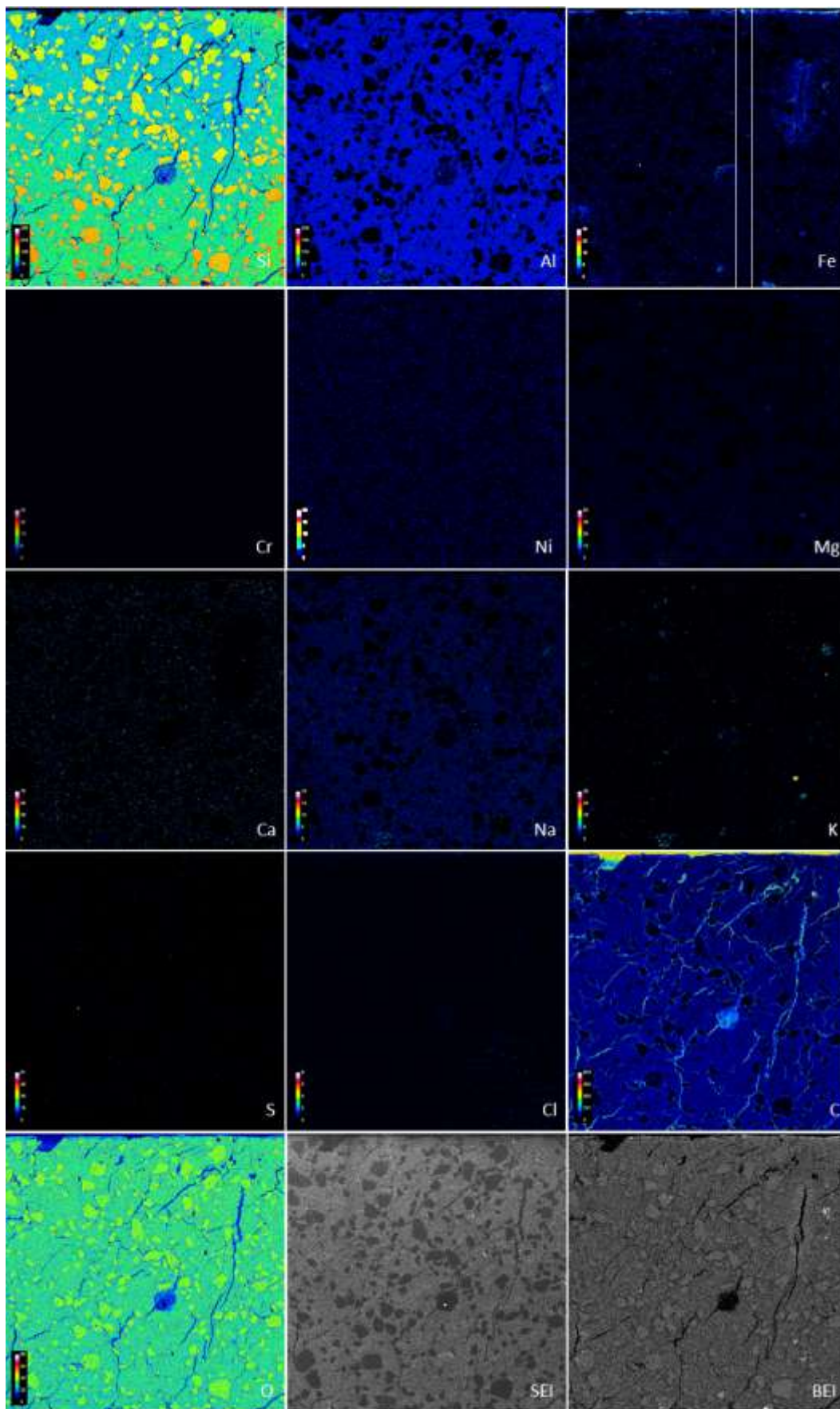


図 4.2.2-9 B-2 試料の元素マッピングデータ(xy スケールは 20x20 mm)

### b Fe プロファイル

取得した各試料のマップデータのうち、Fe について、ラインに沿った強度プロファイルを画像データから抽出してプロットした。

A-2、B-2 試料通のベントナイト内部への Fe 分布を図 4.2.2-10 に示す。B-2 試料の方が、より内部への Fe の移動が見られ、界面濃度も高いことがわかる。

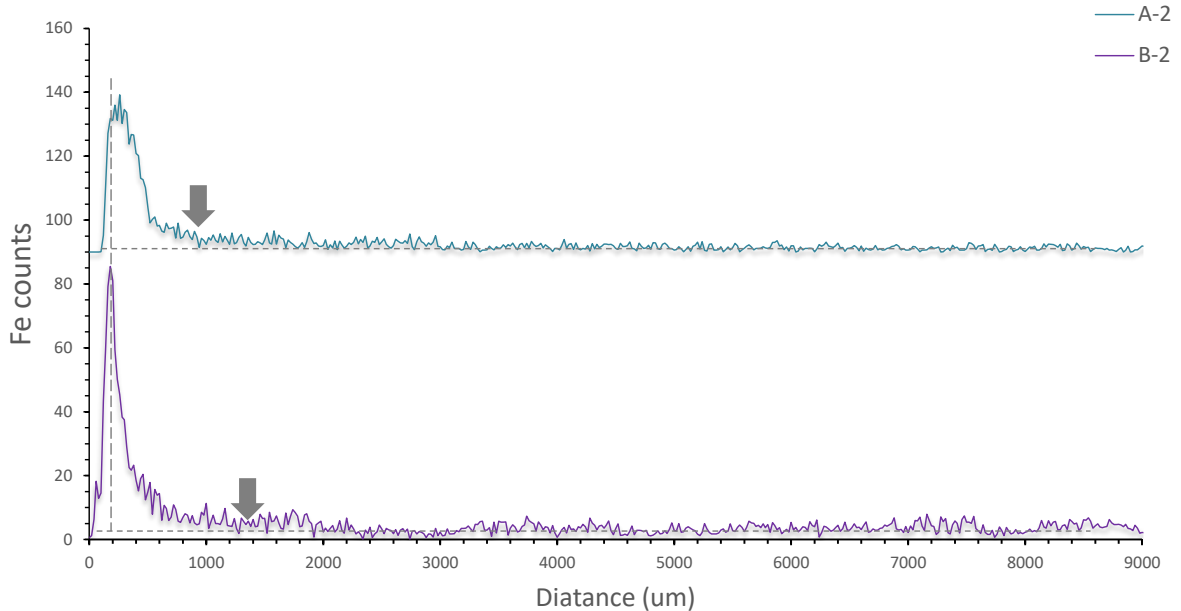


図 4.2.2-10 A-2, B-2 試料の Fe 強度プロファイル

### c スポット分析

接触界面に垂直なラインワイズのステップ分析を試料について行った結果をスメクタイトの構造から得られる元素比に基づいて集計し、界面からの距離と Si, Al, Fe, M tot (八面体サイト陽イオンの総数)の内部プロファイルと比較した図 4.2.2-11 には鋼製モールド接触試料のベントナイト中スメクタイトの分析値を示す。

室温での通水試験における鉄接触ベントナイトにおいて、界面に向かって Si, Al の減少、Fe, M tot (八面体陽イオン総量) の増加が認められる (図 4.2.2-11)。これは、スメクタイトの変質が、陽イオン交換のみではなく、構造の変化を伴っていることを示唆する。後述するが、この試料では、水酸化鉄の沈殿が鉄-ベントナイト接触界面や、その内部において確認されており、分析ではそれらの微細な沈殿相の影響が予想される。

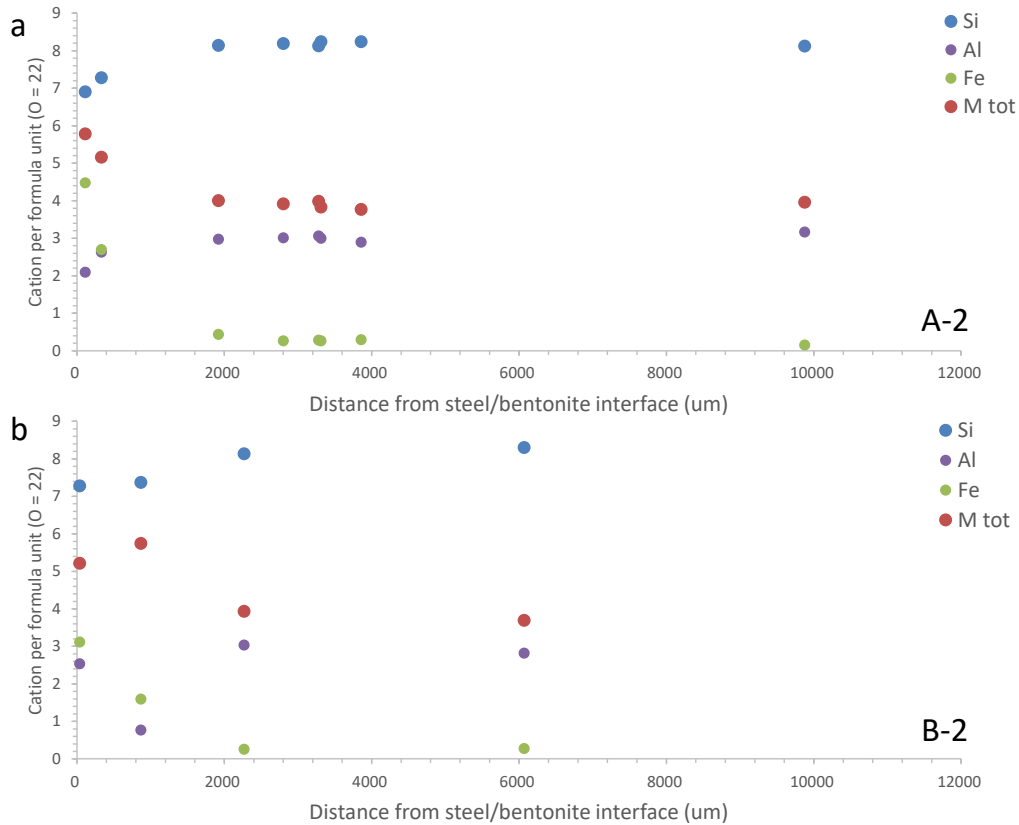


図 4.2.2-11 炭素鋼—ベントナイト通水試験試料のスメクタイト組成(a: A-2, b: B-2; Si, Al, Fe, M tot: 八面体陽イオン総量、O = 22 で計算)

### 3) バッチ浸漬試験後試料

#### a 元素マッピング

元素マッピングの測定結果の代表的な例を図 4.2.2-12、及び図 4.2.2-13 示す。試料名 FW-EBW-10 は、FW : 人工淡水に浸漬、EBW : TIG 溶接部を含む (EBW は電子溶接法)、10 : 約 10 年間浸漬、を示している。図 4.2.2-12 の右の写真は試料の写真であり、赤線で範囲を示した 15mm が溶接部を示し、赤枠は EPMA でマッピングした部分を示す。

図 4.2.2-13 に各元素のマッピング結果を示す。通水試験後の試料と同様に、炭素鋼との接触面の鉄濃度が高いことがわかる。

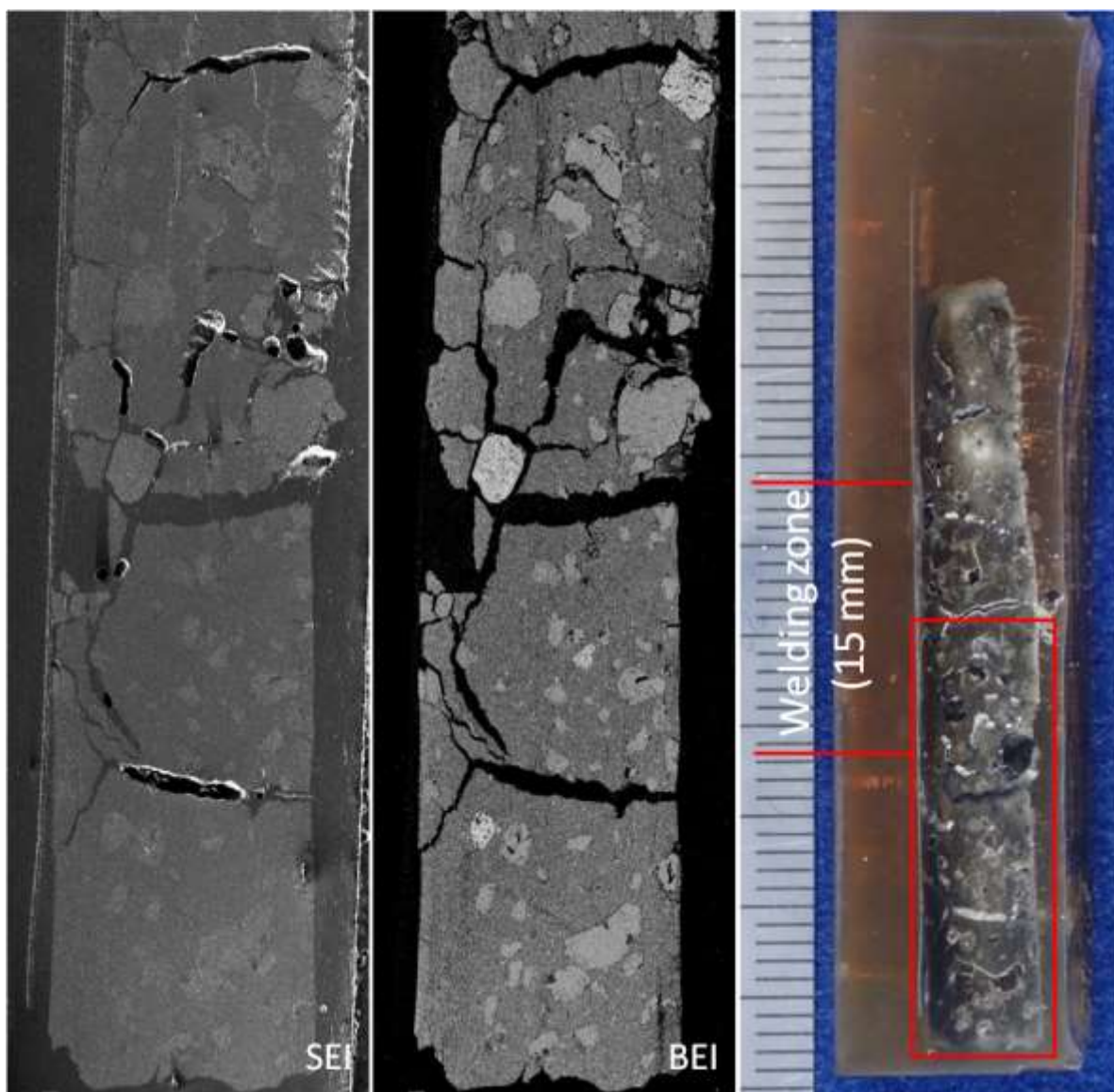


図 4.2.2-12 FW-EBW10 試料の元素マッピングデータ(その 2、xy スケールは 8x24 mm)



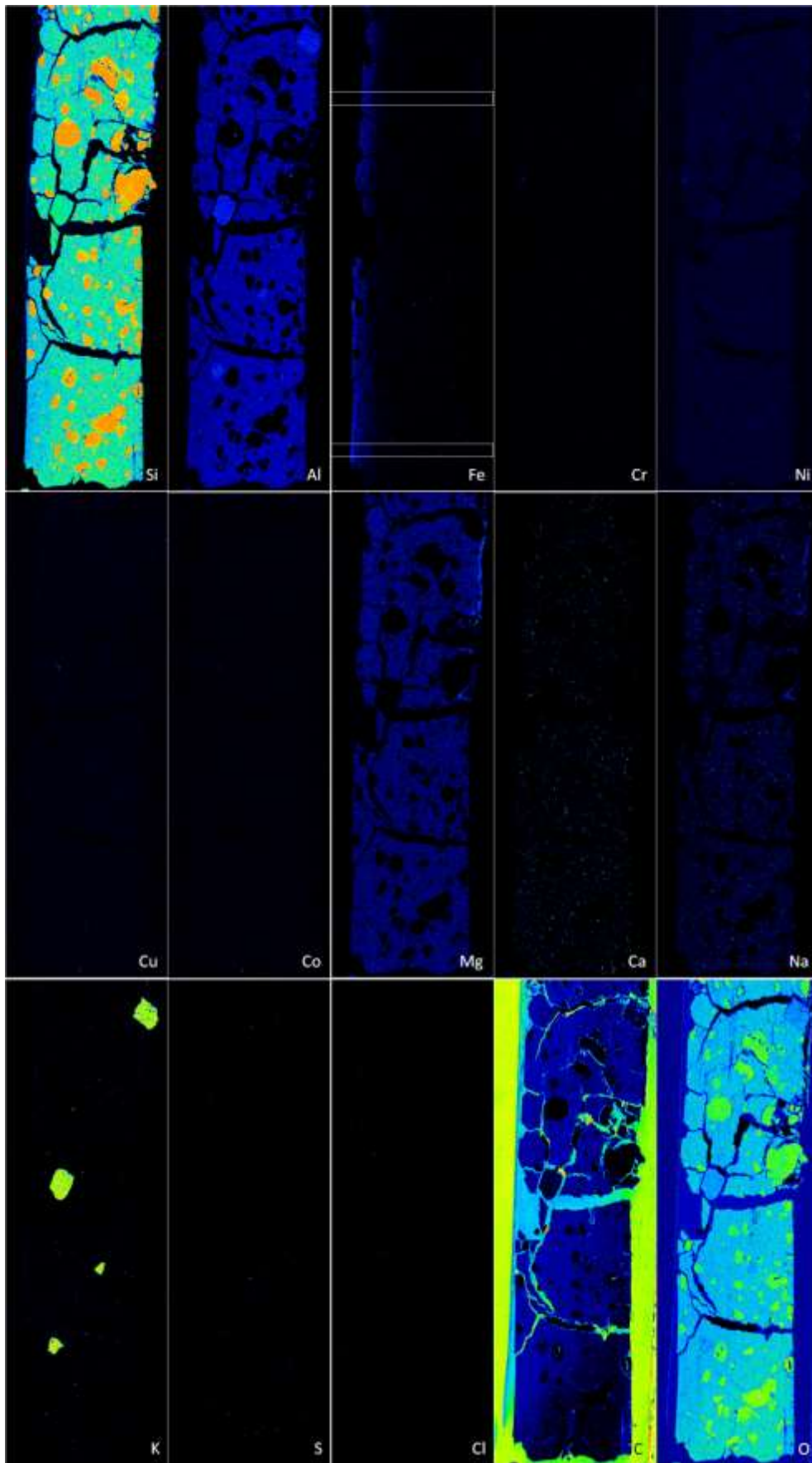


図 4.2.2-13 FW-TIG-10 試料の元素マッピングデータ(その 1、xy スケールは 8x24 mm)

## b Fe プロファイル

取得したマップデータのうち、Fe について、図 4.2.2-13 に画像に示したラインに沿った強度プロファイルを抽出してプロットした。図 4.2.2-14 に結果を示す。各プロファイル上に示したグレイの矢印は界面から内部への Fe の拡散範囲をおよそ示している。Line2 (溶接ゾーン接触部)の方が Line1 (母材接触部)よりも Fe の到達距離が長い傾向がみられるが、この傾向が溶接部に接しているためにおこる傾向であるかどうかは、炭素鋼の分析結果と合わせても明らかにならなかった。カラムの形状 (溶接部がある直情に液相と接する孔がある) ことによるベントナイト中の溶液の拡散速度の差がこの原因になっている可能性も考えられる。

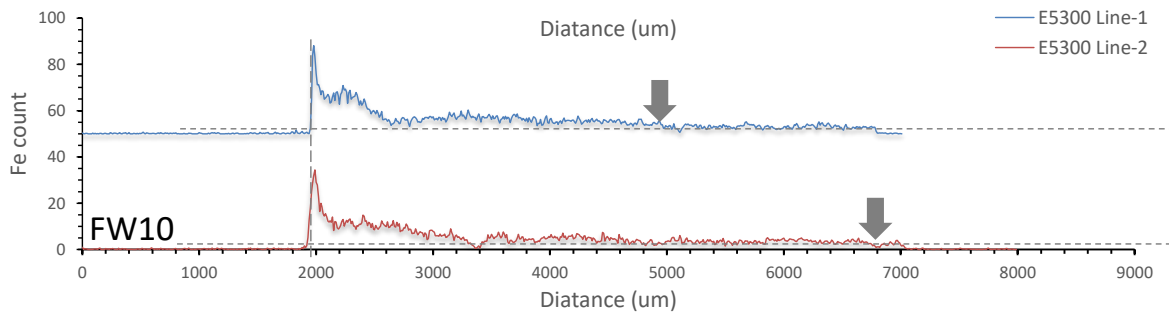


図 4.2.2-14 EBW 溶接炭素鋼試験片における接触ベントナイトの内部 Fe プロファイル

## c スポット分析

通水試験後試料と同様に、炭素鋼接触界面に垂直なラインワイズのステップ分析を試料について行った結果をスメクタイトについて集計し、内部プロファイルを比較した。図 4.2.2-15 に炭素鋼接触試料のベントナイト中スメクタイトの分析値を示す。

上段は 5 年浸漬した後の試料、下段は 10 年浸漬したものである。この試料に関しても通水試験後試料と同様に接触界面に向かって Si, Al の減少、Fe, Mtot の増大が読み取れる。常温での通水試験でもこの傾向が見られたことを考えると、80°C でより長期間の試験後の試料で鉱物変化を伴う変質が起こっていることは十分考えられる。

バッチ浸漬ベントナイト試料でも、EPMA の解像度では確認できないような微細な鉄鉱物の影響が否定できない。そこで、次の FESEM-EDS 分析では、そういった微細鉱物の影響を受けない、分散試料 (単分散可能な条件での) を使った詳細な観察および分析を実施している。

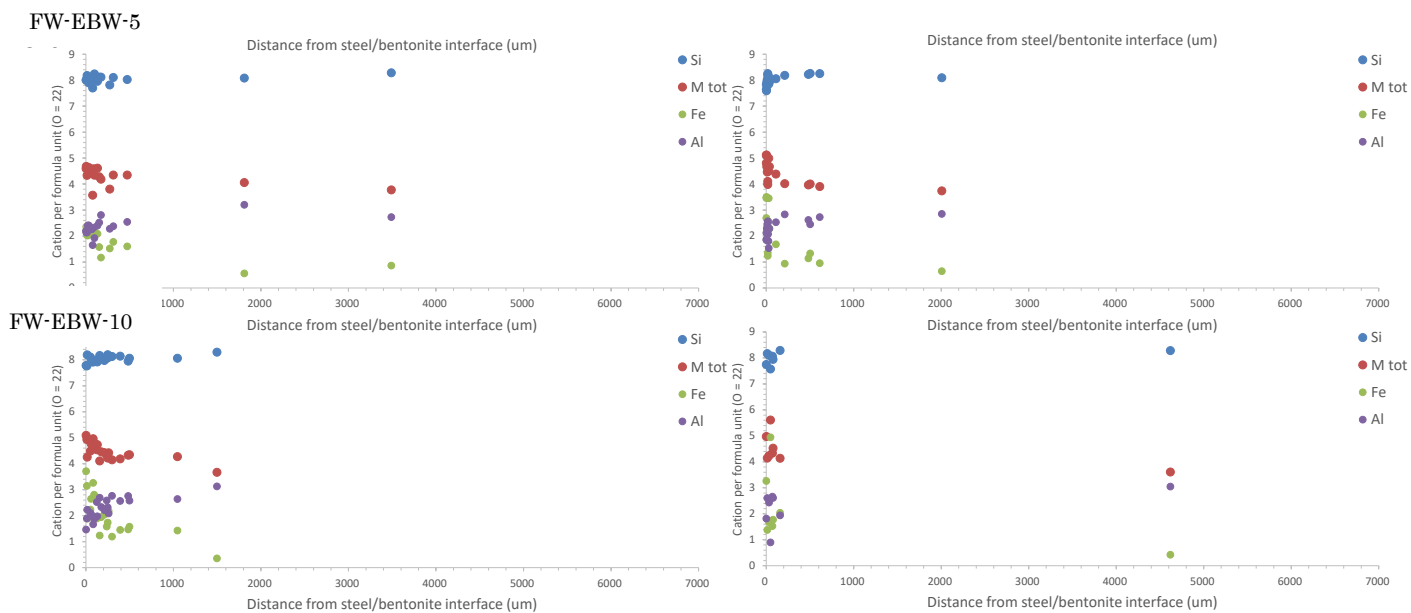


図 4.2.2-15 EBW 溶接炭素鋼—ベントナイト接触試験試料のスメクタイト組成(左 : Line1; 右 : Line2, Si, Al, Fe, M tot: 八面体陽イオン総量、O = 22 で計算)

### (5) FESEM 観察及び EDS 分析

FESEM 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することは EPMA 分析結果を正しく吟味するために不可欠である。そこで、変質鉱物の有無が確認しやすい、分散状態試料を作成し、FESEM-EDS によって観察しながら EDS により化学組成を分析した。試料はバッチ浸漬試料においては、炭素鋼接触界面を含む厚み 2 mm 程度のチップで、溶接ゾーンから離れた終端部①から溶接ゾーン近傍の④までを採取し、水平位置の変化を調べた。また、通水試験試料においては、界面から内部までを①から③まで採取し、内部へ及ぶ Fe 変質挙動を調べた。試料の調整は、試料ごとに複数箇所から局所サンプリングしたものを純水分散させ、イオン交換樹脂により脱イオン処理したものを HOPG (highly oriented pyrolytic graphite: 高配向熱分解黒鉛) 基板に滴下、乾燥固定し、それに白金スパッタコートして行った。

#### 1) 通水試験後試料

##### a 観察

通水試験試料である A-2, B-2 の分散試料で観察・分析を行った。図 4.2.2-16 と図 4.2.2-17 にその観察結果を示す。

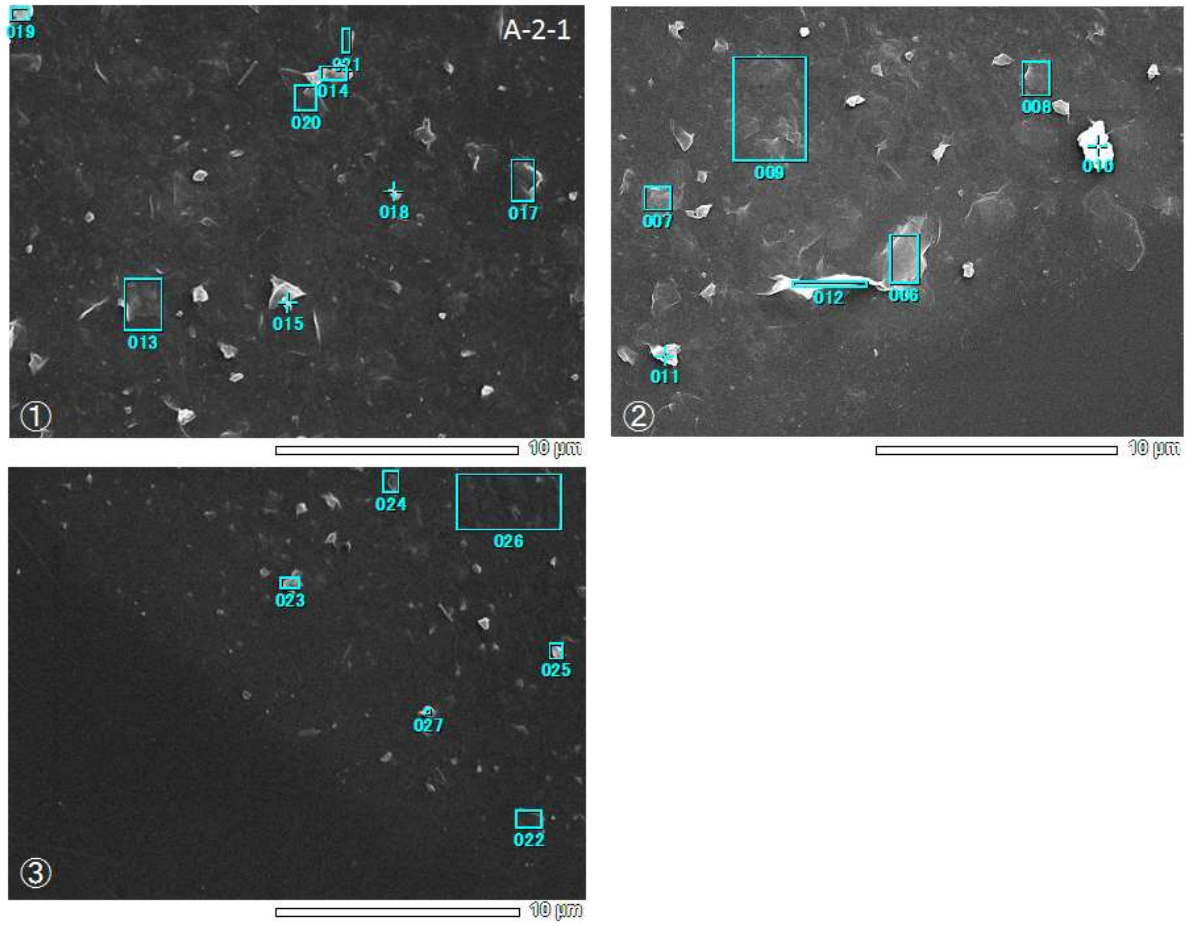


図 4.2.2-16 A-2(結晶質岩模擬試験後)



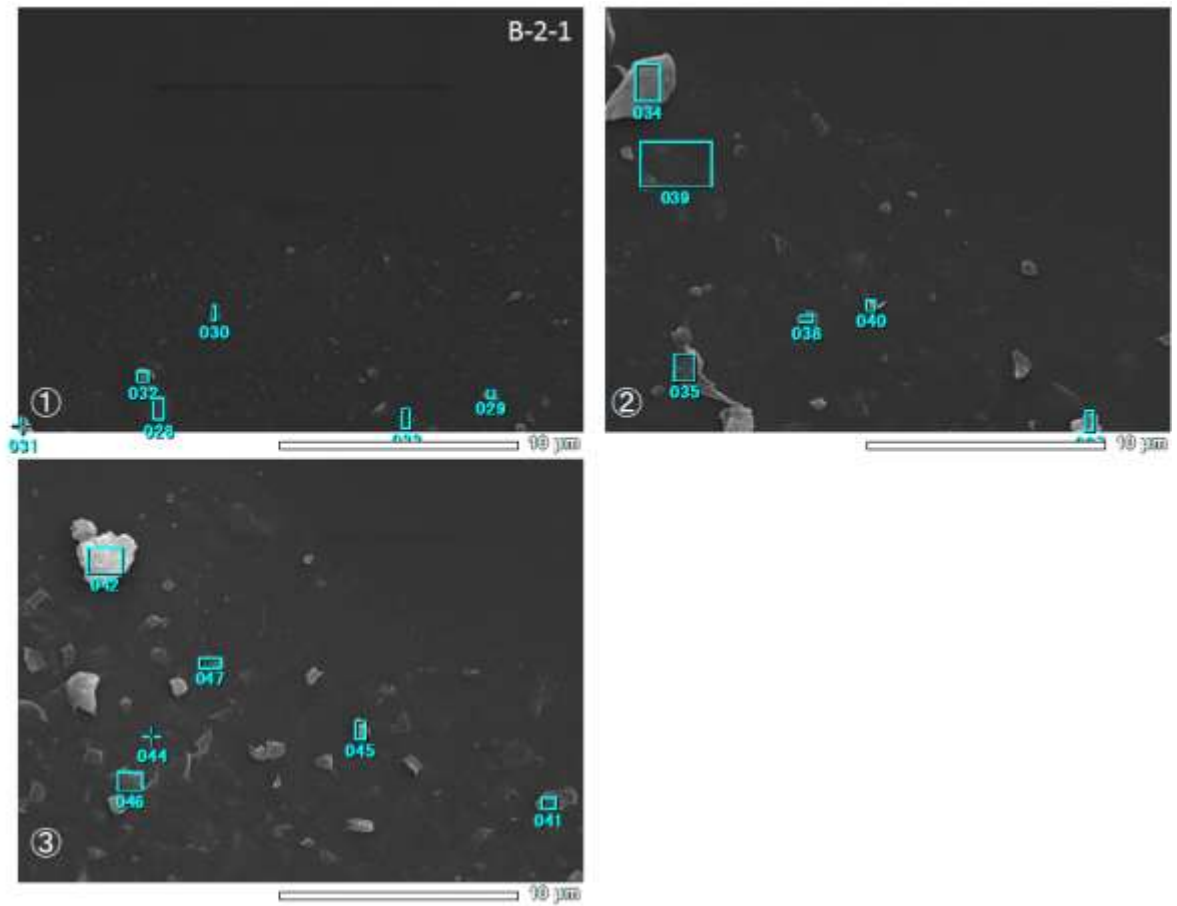


図 4.2.2-17 B-2(堆積岩模擬試験後)

b スメクタイト分析結果

A-2, B-2 試料のスメクタイトの垂直方向の組成分布を図 4.2.2-18 に示す

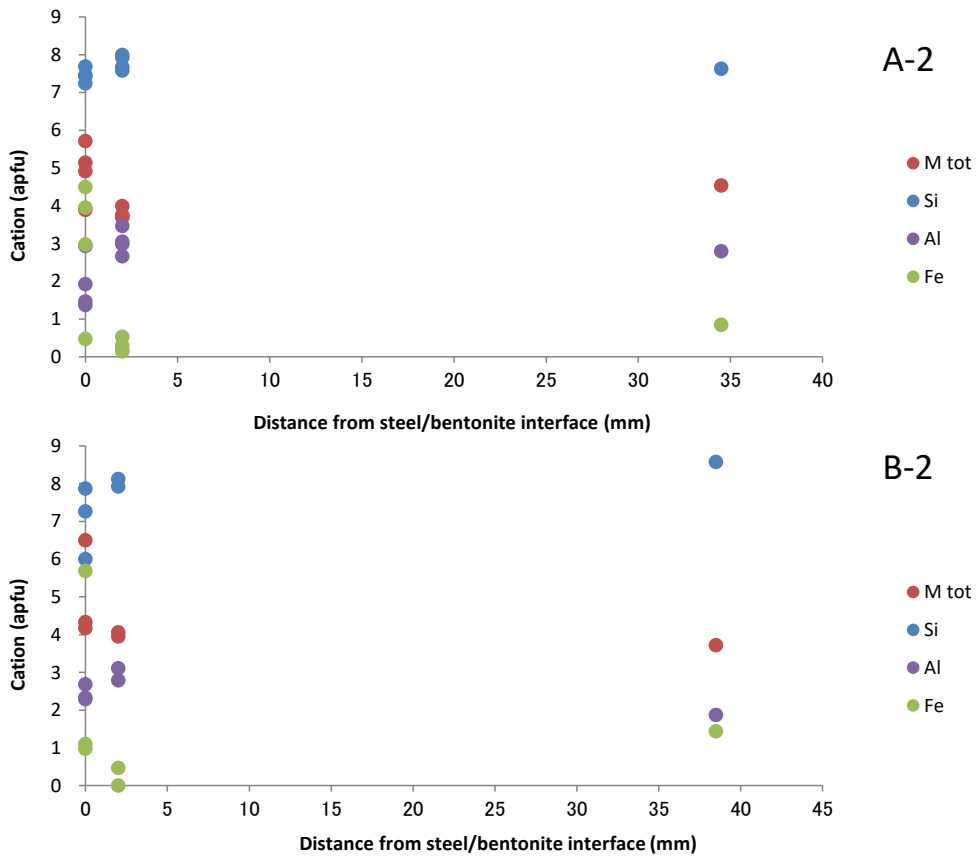


図 4.2.2-18 通水試験試料の変質スメクタイトの垂直方向の組成分布

界面に向かって Si, Al の減少、Fe, M tot 値の増大が見られるが、5 mm 以内の領域に限られる。これらの試料は、分散試料ではなく、接触界面をそのままマイクロチップ採取して観察・分析に供した。図 4.2.2-19 と図 4.2.2-20 に、A-2, B-2 の界面観察結果をそれぞれ示す。A-2 試料の界面は FeOOH 組成（レピドクロサイト）と思われる水酸化鉄に覆われており（図 4.2.2-19）、その下には未変質のモンモリロナイトが存在している。B-2 試料ではモンモリロナイトの空隙にベール状の沈殿相が多数見られる（図 4.2.2-20）。これらは水酸化鉄の組成を示している。しかし、変質相として粒子状のスメクタイトが界面に比較的多く認められ、分析するとノントロナイト組成を示した（図 4.2.2-21）。

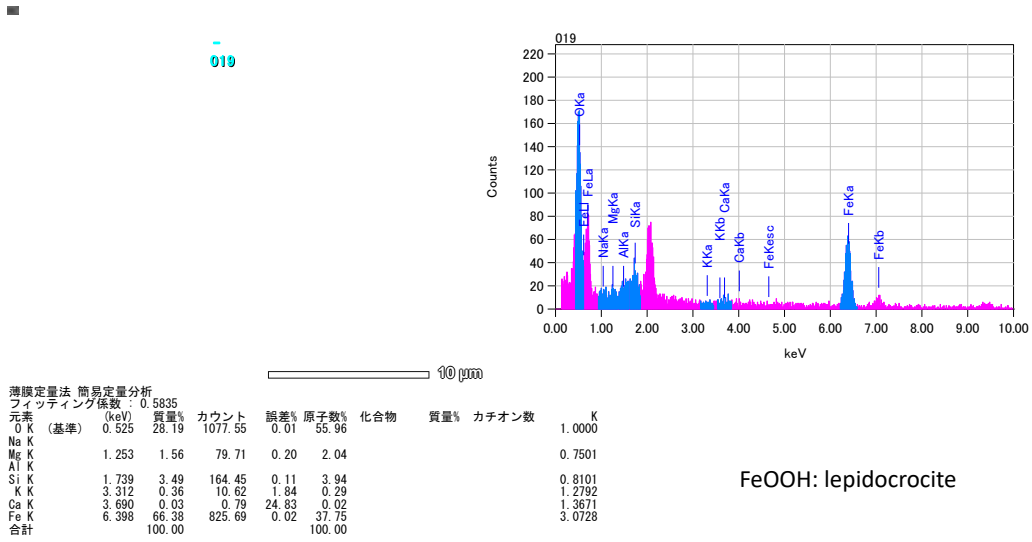


図 4.2.2-19 A-2 試料界面の Fe 水酸化物

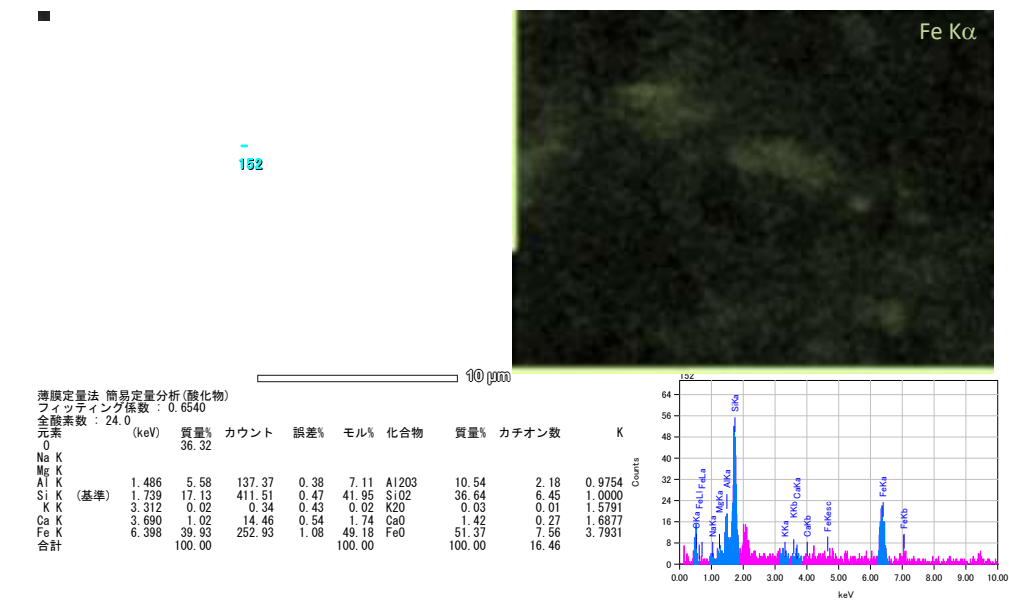


図 4.2.2-20 B-2 試料界面直下の空隙の Fe 水酸化物

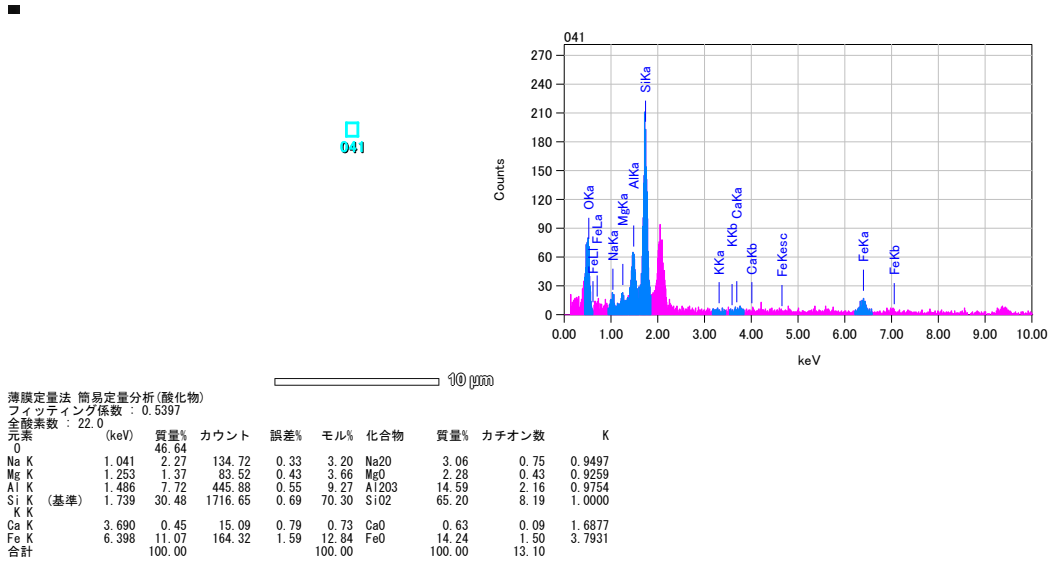


図 4.2.2-21 B-2 試料界面のノントロナイト質スメクタイト

2) バッチ浸漬試験後試料

a 観察

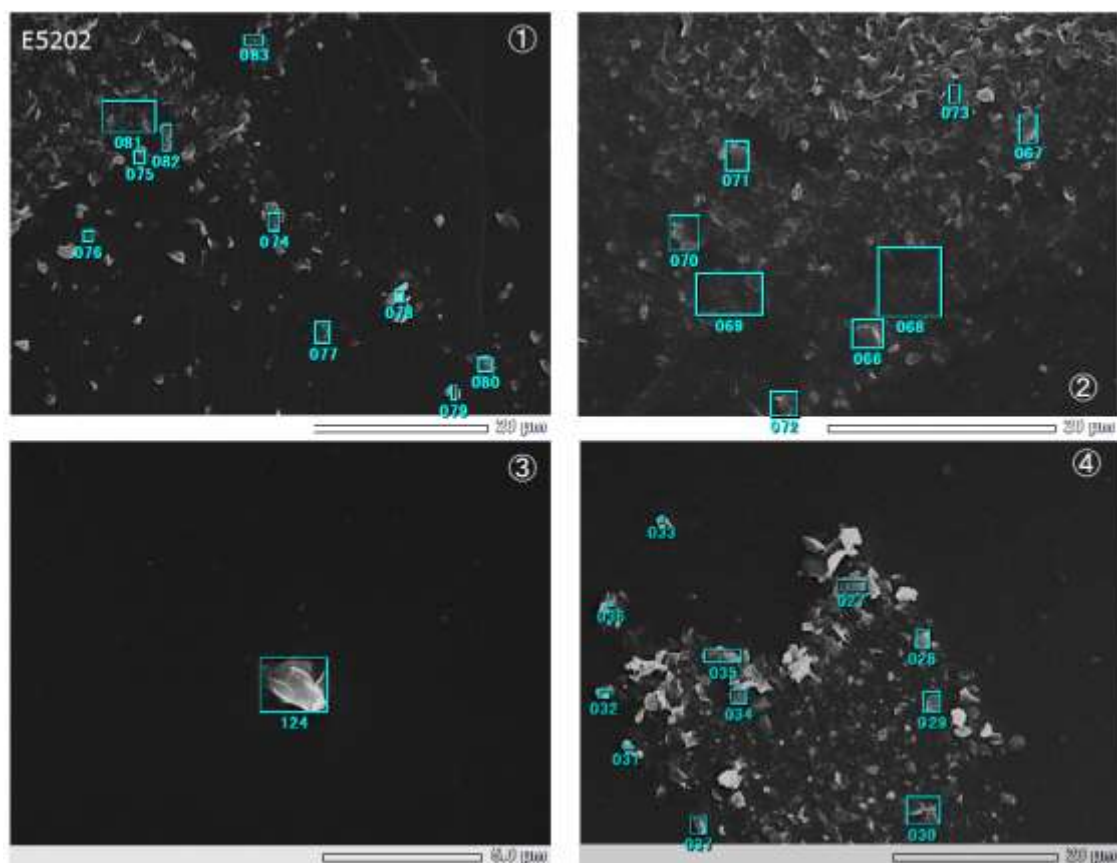


図 4.2.2-22 FW-EBW-10 試料の FESEM-EDS 観察・分析

## b スメクタイト分析結果

観察試料の分析値を、水平方向の位置ごとの組成分布としてプロットしたものを図 4.2.2-23 から示す。この試料に関しては、深さ方向にスメクタイトの元素組成の変化に傾向は見られず、スメクタイトに着目した場合には、変質の傾向は見られない。変質が起こっていると考えるならば、スメクタイトは溶解し、別の鉱物となって沈殿（結晶化）したと可能性がある、

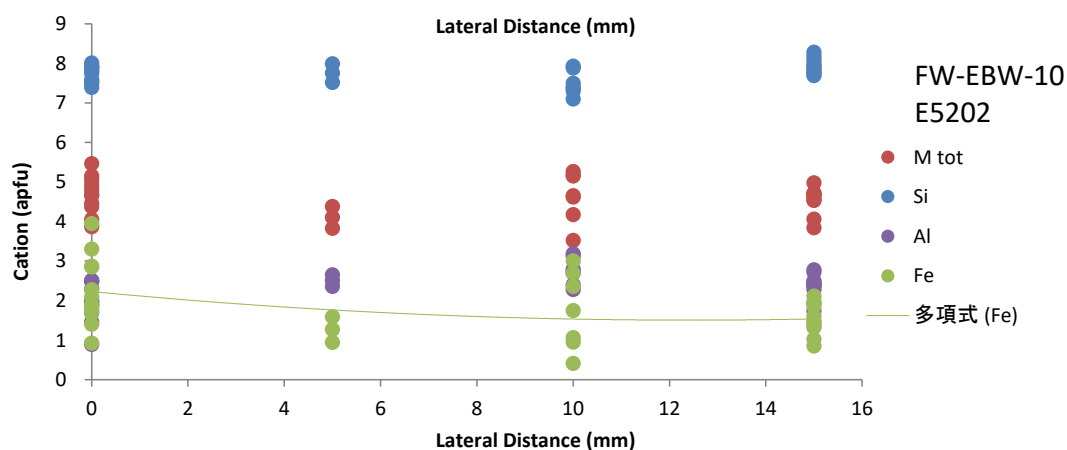


図 4.2.2-23 EBW 溶接炭素鋼での変質スメクタイトの組成分布

## (6) マイクロ XRD 分析

対象試料について  $\mu$ -XRD(Rigaku, Rint-rapid)を使用して X 線回折線のデバイシェラーリングを測定し、生成した二次鉱物、あるいは変質したモンモリロナイトについて解析して鉱物の同定を行った。試料の調整は、EPMA 分析用に真空乾燥調製したものを、各試料の界面試料について試料ホルダーにカーボンテープなどで固定して行った。測定は 300 ミクロンにコリメートした X 線(Cu  $K\alpha$ )を用いて、8 min 間照射して行った。炭素鋼試験片の溶接ゾーン(Welded zone)から充分離れた端部から 0-5 mm 領域を測定対象試料とした。

### 1) 通水試験後試料

測定した試料の写真（中心から 2 番目の円が 300 ミクロン）を図 4.2.2-24 に、測定結果を図 4.2.2-25 にそれぞれ示す。

通水試験試料については、マイクロ XRD 測定と合わせて、セメダイン C を混合し、粉碎した試料による不定方位測定も実施した。マイクロ XRD データは、主に鉄沈殿相に富む界面をスポット分析しているが、水酸化鉄として  $\alpha$ -FeOOH のゲーサイト(G)と  $\gamma$ -FeOOH のレピドクロサイト(L)が認められる。これらの水酸化鉄の準安定相であるフェリハイドライトは確認されなかったことから、これらの鉄沈殿相はある程度時間が経過したものであることがわかる。試料 A にのみレピドクロサイトが確認されるのは、A-2 と B-2 とでこれらの水酸化鉄の成長環境（沈殿時間など）が異なっている可能性を示唆している。バルク状態での測定結果（マイクロ XRD）では、2つの試料間では特に大きな違いは認められないが、不定方位測

定では、クリノプチロライト(CLP)のピーク近傍に未同定の小ピークが A-2 試料には確認できる。2 試料とも、モンモリロナイトのピークは健在であるが、(110)ピーク近傍がブロードになっている、ノントロナイトなどの異なるスメクタイトの存在が示唆される。

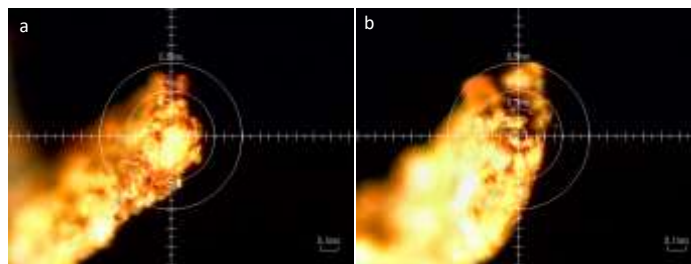


図 4.2.2-24 マイクロ XRD 測定領域(a: A-2-1; B-2-1)

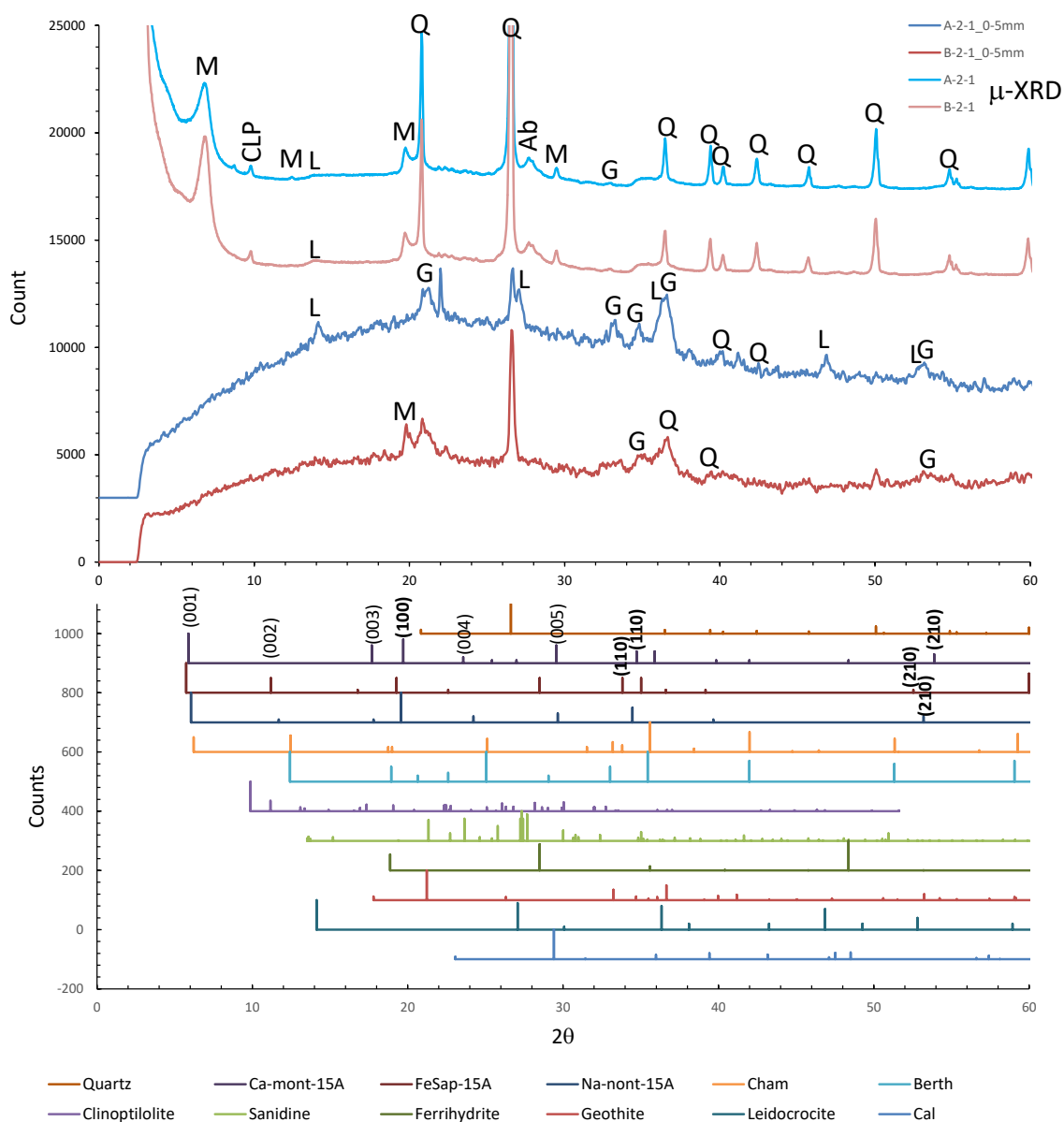


図 4.2.2-25 通水試験の炭素鋼試験片に接触したベントナイトの XRD パターン

## 2) バッチ浸漬試験後試料

通水試験後試料と同様にマイクロ XRD によりデバイシェラーリングを測定し、鉱物の同定を行った。炭素鋼試験片の溶接ゾーン(Welded zone)から充分離れた端部から 0-5 mm 領域を測定対象試料とした。

EBW 溶接試料の人工海水に浸漬したものと人工淡水に浸漬したもののそれぞれ 5 年、10 年後の試料を合わせて示す。測定した試料の写真(中心から 2 番目の円が 300 ミクロン)を図 4.2.2-26 に、測定結果を図 4.2.2-27 にそれぞれまとめて示す。

特徴として、海水系反応試料のスメクタイト(001)回折が弱い。これは、試料を洗浄しないで、カラムから取り出してそのままの状態を真空乾燥したため、塩が析出したためかもしれない。膨潤状態には無関係の(hk0)回折は、スメクタイトの同定に重要であるが、(100), (110) 回折ピークより、どの試料においてもサポナイト(Sap)の存在を確認できた。鉄緑泥石であるシャモサイト(Cha)と鉄アルミ蛇紋石であるバーチェリン(Ber)も検出されている。また、粘土鉱物以外にも特筆すべき二次鉱物として、サニディン(Sad)とフェロシライト(Fs)が認められる。海水系試料には磁鉄鉱(Mag)が確認された。

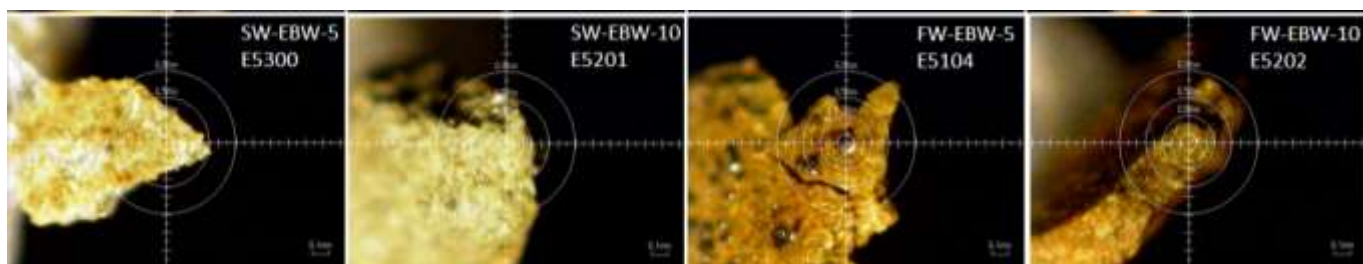


図 4.2.2-26 マイクロ XRD 測定領域(SW-TIG-5 から FW-EBW-10)

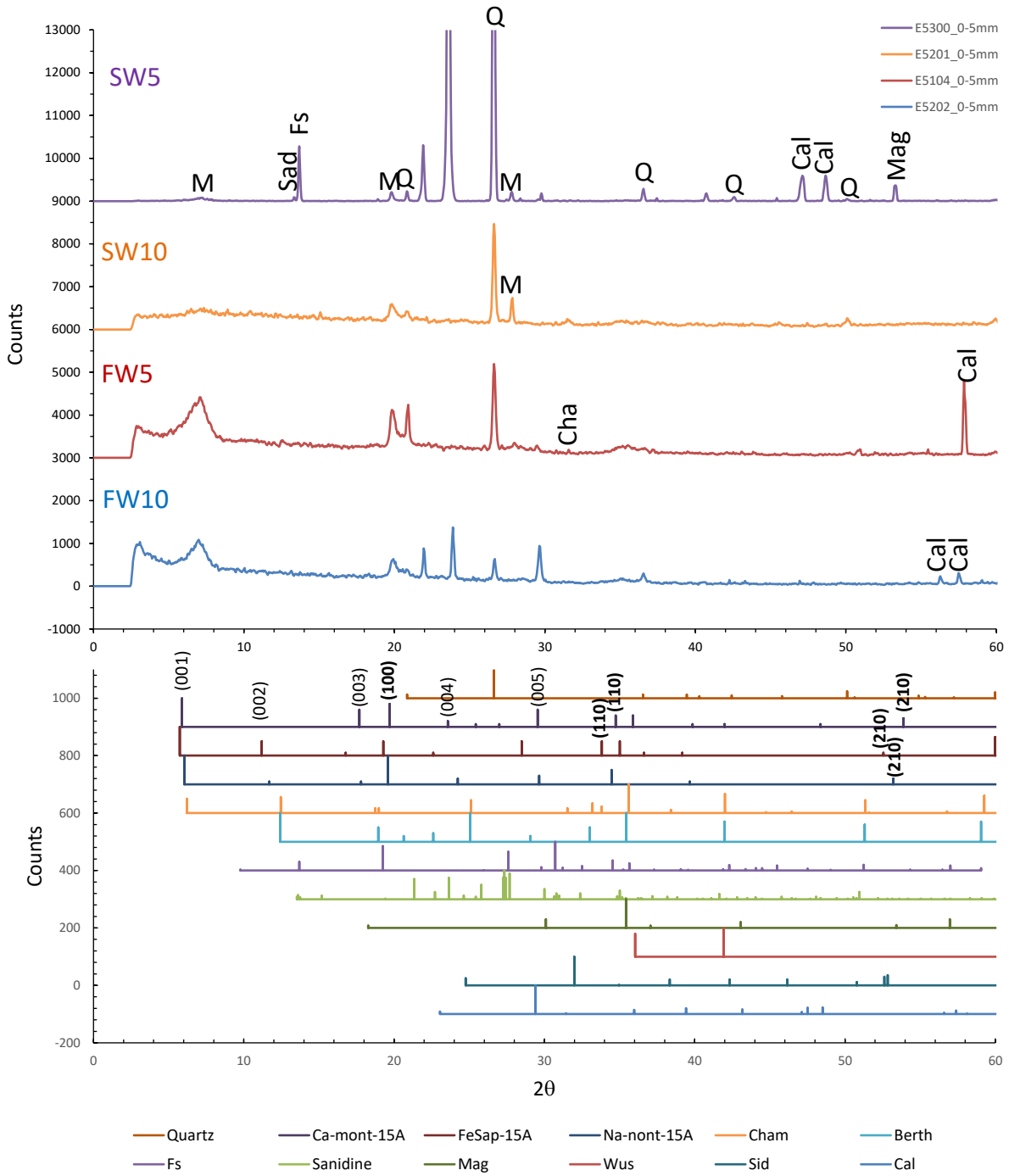


図 4.2.2-27 EBW 溶接炭素鋼試験片に接触したベントナイトの XRD パターン



## (7) 層間陽イオン

ベントナイトの陽イオン交換容量 CEC は、ベントナイトに含まれるモンモリロナイトの鉱物としての層間陽イオン量と、モンモリロナイト含有量で決まる。Kunigel-V1 のモンモリロナイトである Kunipia F の交換性の層間陽イオンは CEC 値としては、 $99.8 \pm 12.8 \text{ meq}/100\text{g}$  (佐藤、2007) [2]が報告されている。また、年代ごとの Kunigel-V1 のモンモリロナイト含有量の分析結果[3]においては、2002, 2007, 2012 年出荷試料においてそれぞれ、43.96, 43.58, 42.64 wt.%であった。平均値でとらえると、Kunigel-V1 のモンモリロナイト含有量は 43.39 wt.%である。したがって、Kunigel-V1 の CEC 値は  $43.30 \text{ meq}/100\text{g}$  となる。非交換性の層状ケイ酸塩への変質が進行した場合、交換性粘土の割合がわからないと、CEC は評価できない。

そこで、従来法による CEC の測定と合わせて、モンモリロナイトなどスメクタイトの層間陽イオン組成を元素分析 (EPMA あるいは FESEM-EDS 等による) により測定した。この測定方法は、既存の溶出法による層間陽イオンの結果との整合が得られることが確認されている。試料は、FESEM 観察及び EDS 分析試料と同じものを使用した。各試料において複数箇所での分析を行った。得られた化学組成をモンモリロナイトなら構造式を酸素数  $O=22$  とし計算することで層間陽イオン組成が算出できる。

低温での炭素鋼—ベントナイト系の淡水通水試験で得られた試料 A-2, B-2 の 2 つについては、従来法での CEC 測定を実施したので、その結果を表 4.2.2-5 に示す。出発試料である Kunigel-V1 試料では  $60.3 \text{ meq}/100\text{g}$  の CEC 値が得られているが、通水試験の界面試料の A-2-1, B-2-1 は減少しており、A-2 の方が顕著である。

EPMA での組成分析により、算出した層間陽イオンおよび CEC を表 4.2.2-6 に示す。この方法においても A-2 の CEC の減少の方が大きい。また、比較のために示したバッチ浸漬試験の試料では、Fe の量が多くなっており、スメクタイトの骨格自体が変わっている可能性もある。

表 4.2.2-5 通水試料後の CEC 分析結果 (従来法)

Sample ID	Specimen ID	Ca (ppm)	Mg	Fe	K	Na	0.1M NaOH titration (ml)	0.1M NaOH titration blank (ml)	Ca (meq/100g)	Mg (meq/100g)	Fe (meq/100g)	K (meq/100g)	Na (meq/100g)	Cation extracted (meq/100g)	CEC (meq/100g)
A-2	A-2-1 (0-2mm)	18.050	1.023	0.180	1.054	24.119	17.70		18.015	1.684	0.129	0.539	20.983	41.350	43.7
	A-2-1 (0-2mm)	21.210	1.339	0.402	1.185	27.707	17.72		21.169	2.204	0.288	0.606	24.103	48.370	43.3
	Average	19.630	1.181	0.291	1.119	25.913	17.71		19.592	1.944	0.209	0.573	22.543	44.860	<b>43.5</b>
B-2	B-2-1 (0-2mm)	18.728	0.940	0.014	1.058	24.143	16.94		18.692	1.546	0.010	0.541	21.003	41.793	58.9
	B-2-1 (0-2mm)	22.424	1.131	0.065	1.221	28.530	17.20	19.885	22.381	1.861	0.047	0.625	24.820	49.733	53.7
	Average	20.576	1.035	0.040	1.140	26.337	17.07		20.536	1.704	0.028	0.583	22.912	45.763	<b>56.3</b>
Kunigel-V1	V1-1	17.074	0.986	0.070	0.715	24.139	16.97		17.041	1.622	0.050	0.365	20.999	40.078	58.3
	V1-2	22.299	1.167	0.066	0.946	35.700	16.77		22.255	1.920	0.047	0.484	31.057	55.764	62.3
	Average	19.687	1.076	0.068	0.830	29.920	16.87		19.648	1.771	0.049	0.425	26.028	47.921	<b>60.3</b>

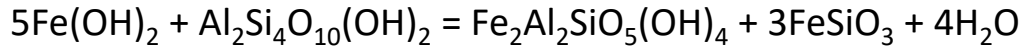
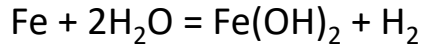
表 4.2.2-6 層間陽イオンおよび CEC 分析結果 (EPMA 法)

試験方法	試験No	Si	M tot (apfu)	Fe	Al	Ca	Na	K	FW*	CEC (meq/Smec100g)
通水試験	A-2	7.90	4.30	1.11	2.85	0.10	0.23	0.03	773.61	60.71
	B-2	7.77	4.65	1.31	2.29	0.19	0.24	0.04	789.84	83.64
バッチ浸漬試験	E5202	8.04	4.45	2.02	2.31	0.17	0.18	0.02	805.17	68.27

FW = formula weight (O = 22).

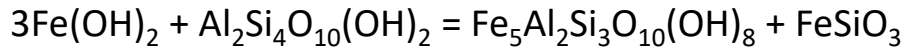
(8) 鉄との相互作用による変質メカニズム

鉄の溶解から始まる、鉄によるベントナイトの変質は図 4.2.2-28 に示す反応式で整理できる。

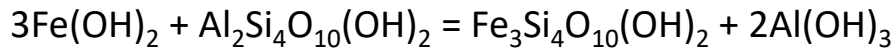


montmorillonite

berthierine



chamosite



Fe-saponite

**Non-swelling: berthierine (serpentine)**

**chamosite (chlorite)**

**Swelling: saponite (tro-octahedral smectite)**

図 4.2.2-28 鉄とモンモリロナイトの反応過程と変質相の生成

純水に近い系であれば、Fe の溶解によって生成する  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  は溶解度が高く、平衡溶液の pH は 25°C の場合、10.4、80°C の場合、9.1 とアルカリ条件となる。モンモリロナイトは溶解して Fe-Al 蛇紋石であるバーチェリンや Fe 緑泥石であるシャモサイトに変質する。しかしその時に余剰のシリカが生成するために、Fe が過剰にあればフェロシライトも生成する。炭素鋼の界面に見られたのは界面よりより深い部分に見られる粒状のウスタイトから、亀裂を伴う Fe 斜方輝石であるフェロシライトと、その上に分布する Fe 蛇紋石であるグリーンライト、さらに Fe サポナイトまでの積層変質相であった (図 4.2.2-29)。表層に向かって、徐々に  $\text{SiO}_2$  成分が多くなっていく傾向が示された。

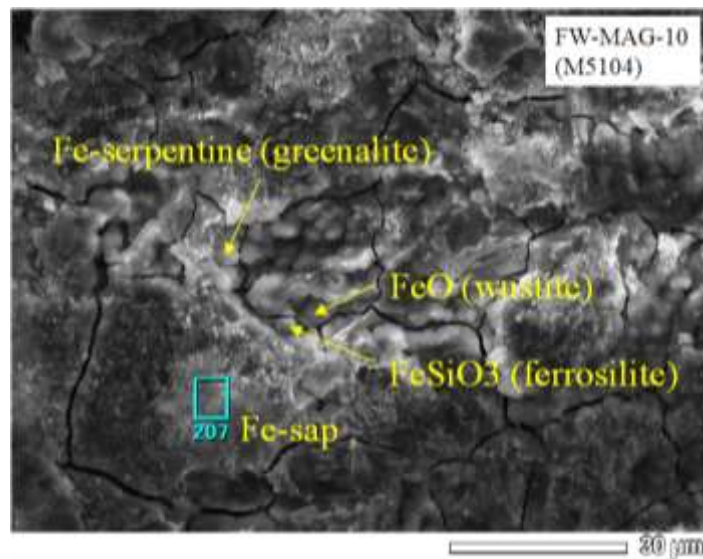


図 4.2.2-29 人工淡水に 10 年間浸漬した試料における界面変質相の産状

Wilson et al. (2008)[4]は解析的な手法で、この Fe-ベントナイト相互変質反応を説明したが、彼らは通常の地下水組成においては、先にバーチェリンが生成し、後からサポナイトへと交代されていくモデルを提唱した (図 4.2.2-30)。

しかし、今回の淡水系の場合は、ウスタイトが生成し、モンモリロナイトや大量に存在するシリカの溶解によってフェロシライトが生成し、それと平衡な Fe 鉱物 (蛇紋石や緑泥石) が生成する。しかし、低い Fe 濃度であれば、それらに代わって Fe サポナイトが生成し、今度はフェロシライトではなく、ギブサイト ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) が余剰成分として共存するようになる (図 4.2.2-28) だろう。

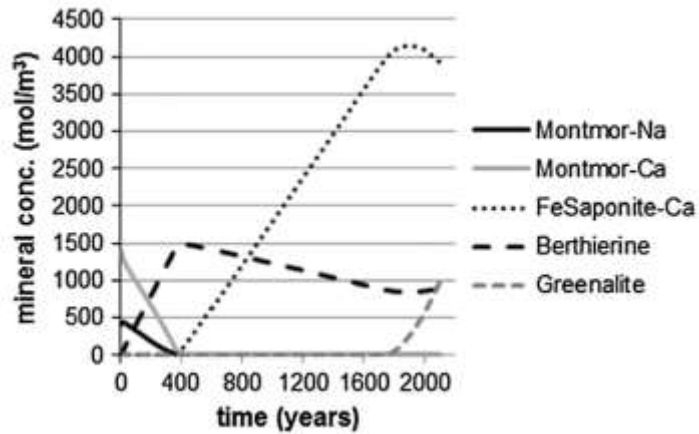


図 4.2.2-30 Wilson et al. (2008)による鉱物変遷モデル

炭素鋼表面で観察・分析された変質相のデータを元に、変質のシステムを Si-Al-Fe+Mg 三成分系で考えると、図 4.2.2-31 に示すプロットが表せる。今回分析した、バッチ式浸漬試験の結果も合わせ、海水系、淡水系の全てを図上にプロットした。

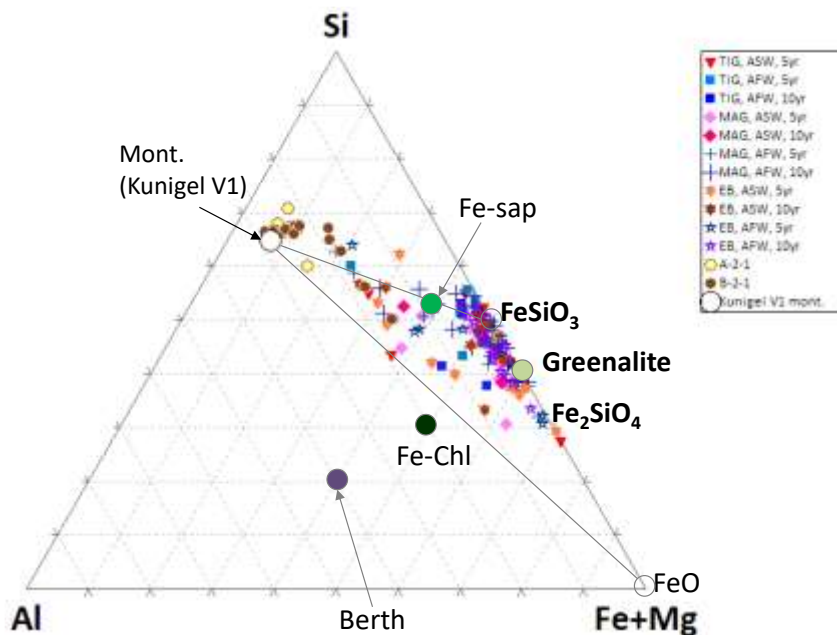


図 4.2.2-31 Si-Al-Fe+Mg 三成分系で表す Fe-モンモリロナイト変質システム

海水系、淡水系ともに、多くの変質相はフェロシライト–グリーンライト–モンモリロナイトの領域に集中していることがわかる。その間に Fe サポナイトが存在し、この反応系がこれらの鉱物で説明ができると考えられる。従来考えられてきた Fe-Al 鉱物のバーチェリンや理想的な組成のシャモサイトは、実際の反応系ではおそらく生成しないと思われる。この理由としては、潜在的なサニディンが Al の沈殿相として生成可能であることが影響していると思われる。もしもサニディンができなかった場合は、緑泥石化が起こるかもしれない。

また、低温の変質試料である通水試験試料でも、明らかにサポナイト組成に向かっている組成変化が見られ、低温でも pH が高い条件であればモンモリロナイトの変質は進行する可能性が示された。

#### 4.2.3 化学変質による膨潤性能低下の検証

##### (1) 試験の概要

4.2.1 の検討の目的で述べたように、長期に亘る人工給水によって最大送水（破過）圧が増加せずに下降した原因の一つとして、ベントナイトの変質による膨潤圧の低下が考えられる。そこで、図 4.2.1-2 に示した変質部のブロックサンプルを用いて、変質前後の膨潤圧と破過試験時の最大送水（破過）圧を比較し、化学変質による最大送水（破過）圧低下の原因について検討を行った。

図 4.2.3-1 には膨潤圧と破過圧の関係を取得した試験装置のイメージを示す。この試験装置は、通常の膨潤圧試験と同様に、供試体を体積拘束した状態で下面から給水し、その際の膨潤圧を計測することが可能である。さらに、供試体上面からも給水することが可能であり、給水圧を増加させることによって破過試験も実施可能である。この試験装置によって、膨潤圧と破過圧を同じ供試体で同時に計測可能であるため、膨潤圧と破過圧の関係を取得可能である。

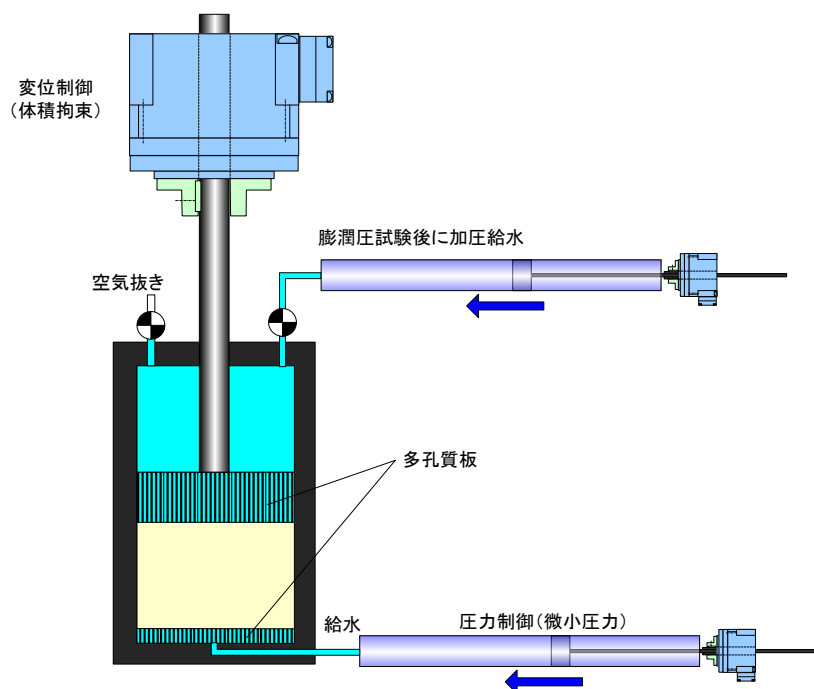


図 4.2.3-1 破過圧試験装置の概念図

図 4.2.3-2 には、試験結果のイメージを示す。試験の前半（膨潤圧計測過程：O~A）では、供試体底面に膨潤圧に対して十分に低い一定圧(10kPa 程度)で給水し膨潤圧を計測する。この際、上面から排水を確認し、給水量と排水量が同程度になるなどの定常状態であることを確認する。供試体が十分に飽和して定常状態に達したと判断できた段階で、破過圧計測過程（A~B）に移行する。破過圧計測過程では、供試体上面から給水圧を漸増させる。給水開始当初の給水圧は供試体に対して全応力として作用するものと考えられるため、給水圧が増加するほど膨潤圧計測過程では膨潤圧として計測されていた軸圧が漸減する。この軸圧が漸減し、ゼロとなると供試体の上面と上部多孔質板の間に隙間が発生し、載荷板が水中に浮いた状態となったことを意味する。この状態が、前述の吹付け施工した実規模緩衝材の破過圧試験で、1/4 鋼製モールドと緩衝材の間に隙間生じて破過が発生した状態であると考えられる。

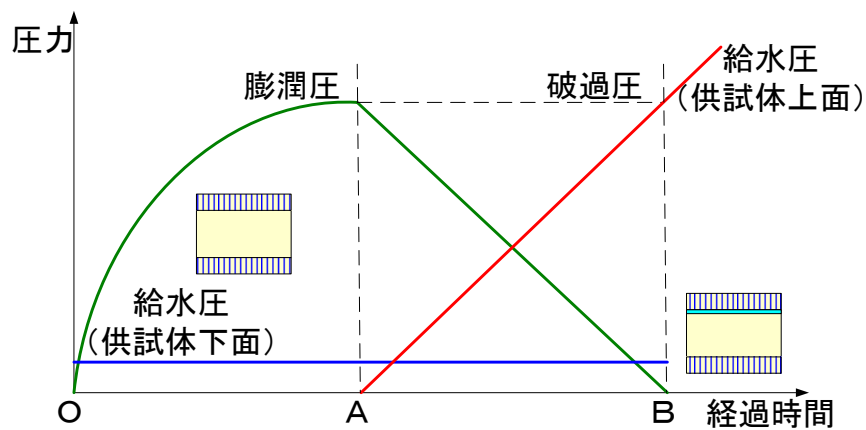


図 4.2.3-2 膨潤圧・破過圧試験の結果のイメージ

図 4.2.3-3 には、実際の破過圧試験装置を示す。供試体の上下面から水圧を掛けられるように給排水口が鋼製セルの上下部にあり、鋼製セルは 3MPa 程度の高圧を付与できる強度を有している。また、セルの上部には、供試体から排気された空気や通水経路にトラップされた空気を抜くための排気口を設けてある。さらに、供試体上下面にはポーラスメタルを設置し、上下面に作用する水圧が供試体に均等に作用するように工夫している。また、下部のポーラスメタルの下には、SKB に倣い、給水液を循環させて常に同じ組成の液体を供給できるように螺旋状に溝を設置した。



図 4.2.3-3 破過圧試験装置

表 4.2.3-1 に膨潤圧と破過圧の関係取得のための試験ケースを示す。試験は、前述の吹付け施工した実規模緩衝材を解体する際に採取した変質試料に加えて、Na 型ベントナイトで乾燥密度をパラメータとしたものとケイ砂 30wt%混合 Ca 型化ベントナイトについても試験を実施した。

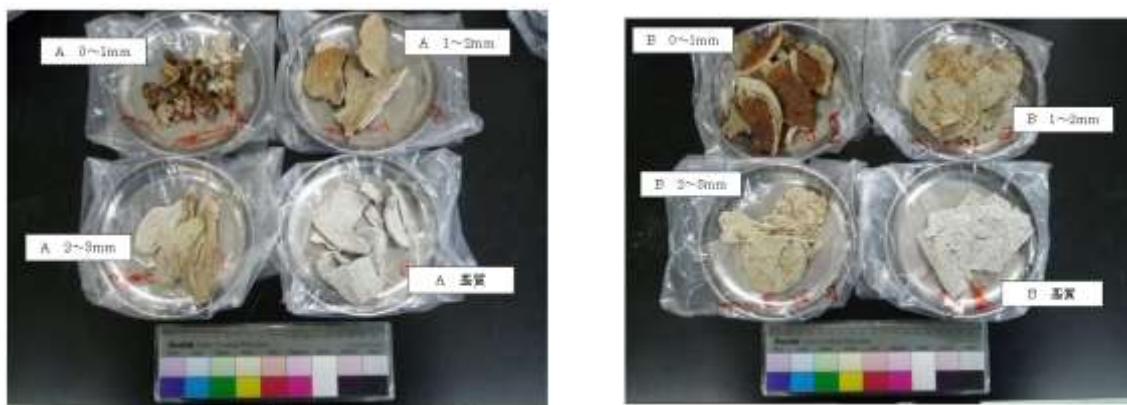
表 4.2.3-1 変質ベントナイトの膨潤圧と破過圧取得試験 試験ケース

ベントナイト 平均乾燥密度	液種	供試体	最大 通水圧	試験項目
1.6Mg/m <sup>3</sup> 程度 (Na 型ケイ砂 30wt% 混合)	H <sub>2</sub> O	堆積岩盤湧水模擬 ケース試験後	1MPa 程度	膨潤圧 破過圧
		結晶質岩盤湧水模 擬ケース試験後		
Na 型ベントナイト				
1.3Mg/m <sup>3</sup>				
1.6Mg/m <sup>3</sup>				
1.9Mg/m <sup>3</sup>	Ca 型ベントナイト			
1.6Mg/m <sup>3</sup> 程度 (Ca 型ケイ砂 30wt% 混合)				

変質試料に関しては、波長分散型 X 線(XRF)分析を行い、緩衝材と鋼製モールドとの界面からの距離をパラメータとして適切な厚さを決定した。XRF では、界面から 1mm 刻みで 3mm 程度の範囲までスライスし、140℃で炉乾燥させた(図 4.2.3-4)後に、メノウ乳鉢で粉碎し、目開き 108 $\mu$ m のナイロン製メッシュで篩を掛けたものを圧縮成型して用いた。表 4.2.3-2 と図 4.2.3-5 に変質試料の XRF 試験結果を示す。試験結果から、表面から 1mm 程度までは鉄の割合が多いこ



とが分かる。このことから、変質試料に関しては、緩衝材と鋼製モールドの界面から1 mmまでの部分を集めて成型して試験に供した。



堆積岩盤湧水模擬ケース

結晶質岩盤湧水模擬ケース

図 4.2.3-4 XRF 分析に供した乾燥後の試料

表 4.2.3-2 変質試料に対する XRF 試験結果一覧

変質試料	堆積岩盤湧水模擬ケース				結晶質岩盤湧水模擬ケース				
	界面からの距離	0-1mm	1-2mm	2-3mm	基質	0-1mm	1-2mm	2-3mm	基質
SiO <sub>2</sub>	%	73.26	77.20	75.16	76.69	76.21	76.09	76.60	75.99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	13.37	13.21	14.50	13.88	13.17	14.20	13.93	14.39
MgO	%	2.69	2.72	2.92	2.83	2.70	2.86	2.86	2.93
CaO	%	1.96	2.14	2.53	2.66	1.95	2.14	2.12	2.66
Na <sub>2</sub> O	%	1.74	1.85	2.05	1.75	1.73	1.83	1.83	1.84
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	5.80	1.96	1.79	1.26	3.23	1.89	1.68	1.28
K <sub>2</sub> O	%	0.34	0.33	0.37	0.34	0.32	0.35	0.34	0.35
SO <sub>3</sub>	%	0.47	0.34	0.40	0.31	0.41	0.39	0.39	0.30
TiO <sub>2</sub>	%	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11	0.12	0.11	0.12
MnO	%	0.18	0.09	0.09	0.09	0.12	0.08	0.08	0.09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
ZrO <sub>2</sub>	%	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02
SrO	%	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
合計		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0



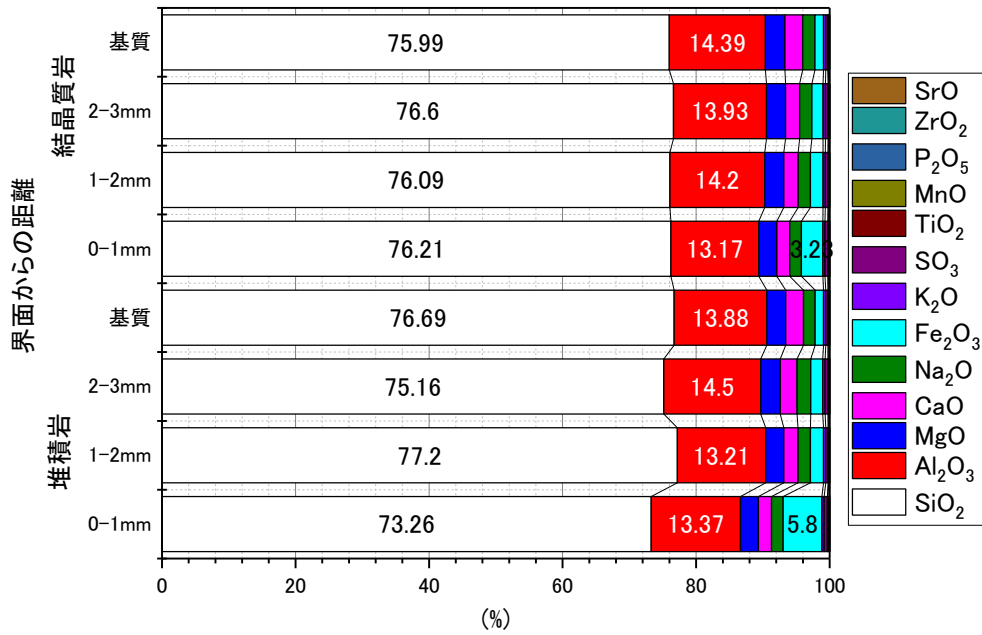


図 4.2.3-5 変質試料に対する XRF 試験結果

(2) 試験結果

図 4.2.3-6 に、水圧のみを付与した場合の軸応力の変化を示す。試験装置は、理論的には、供試体上面の多孔質板と供試体の間に隙間が生じると水中に多孔質板が浮いたような状態となり、軸応力はほとんどゼロとなる。しかしながら、実際には、多孔質板の上部にはロードがあり、上面と下面で水圧の作用する面積に差が存在する。さらに、水圧を増加させると、少なからず試験機が歪むために、このひずみの影響がロードセルには軸応力の変化として現れる。

このため、試験機の空のセルに水圧を付与した場合の軸応力の変化を事前に取得して、これらの影響を除去するための検量線を取得した。各水圧段階において、軸応力は漸増しながら収束傾向を示していることが分かる。この収束値を連ねる検量線を求めると、 $\sigma_a = 0.077u - 18$  となった。ただし、 $\sigma_a$  は軸応力、 $u$  は供試体上面に作用させる水圧である。

以下の試験結果は、この検量線で補正した軸応力を膨潤圧として標記することとした。

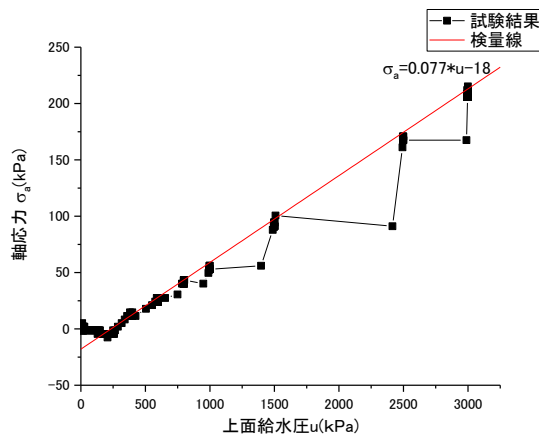


図 4.2.3-6 空セルで水圧のみを付与した場合の軸応力の変化

## 1) Na型ベントナイト

図 4.2.3-7 には、各乾燥密度の膨潤圧の経時変化を示す。図から、各ケースとも膨潤圧がほぼ定常状態となっていることが分かる。膨潤圧試験の初期応力は、一次元排気圧縮試験で所定の乾燥密度に締固め際の締固め圧力である。

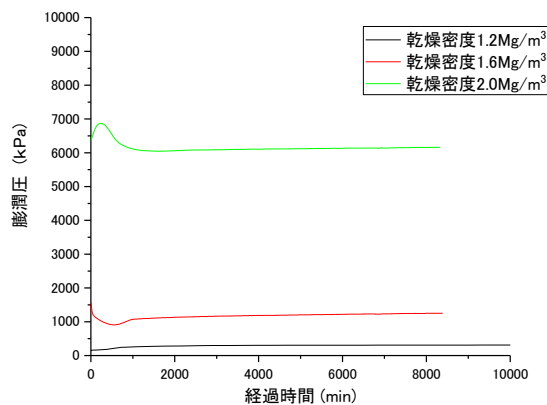


図 4.2.3-7 各乾燥密度の膨潤圧の経時変化

図 4.2.3-8 には、各乾燥密度の給水圧と膨潤圧の経時変化を示している。乾燥密度  $1.2\text{Mg/m}^3$  のケースでは、図 4.2.3-6 に示した検量線を用いた補正の前後の膨潤圧も示している。図から、補正することによって、最大で膨潤圧が 10%弱小さくなっている。さらに、乾燥密度  $1.2\text{Mg/m}^3$  のケースでは、有効膨潤圧がゼロとなる点を青矢印で示している。乾燥密度  $1.2\text{Mg/m}^3$  のケースでは、給水圧が  $250\text{kPa}$  程度で、有効膨潤圧で定義した破過する可能性がある。一方、全応力で定義した破過は発生する可能性が低い。これは、乾燥密度  $1.2\text{Mg/m}^3$  のケースでは、比較的透水係数が大きいためであると考えられる。

乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  のケースでは、有効膨潤圧がゼロとなる点を青矢印で、さらに補正後の膨潤圧がほぼゼロとなる点を赤矢印で示している。乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  のケースでは、給水圧が  $1000\text{kPa}$  程度で、有効膨潤圧で定義した破過が発生する可能性がある。一方、全応力で定義した破過は給水圧が  $3000\text{kPa}$  程度で発生する可能性が高い。これは、乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  のケースでは、比較的透水係数が小さいためであると考えられる。

乾燥密度  $2.0\text{Mg/m}^3$  のケースでは、本試験条件の範囲では有効膨潤圧がゼロとなる点や補正後の膨潤圧がゼロとなる点が得られなかった。これは、膨潤圧が  $6\text{MPa}$  程度と非常に高いためであると考えられる。乾燥密度  $2.0\text{Mg/m}^3$  のケースでは、比較的透水係数が小さいが、その分、膨潤圧も大きいために破過が発生するためには更に大きな給水圧が必要であると考えられる。

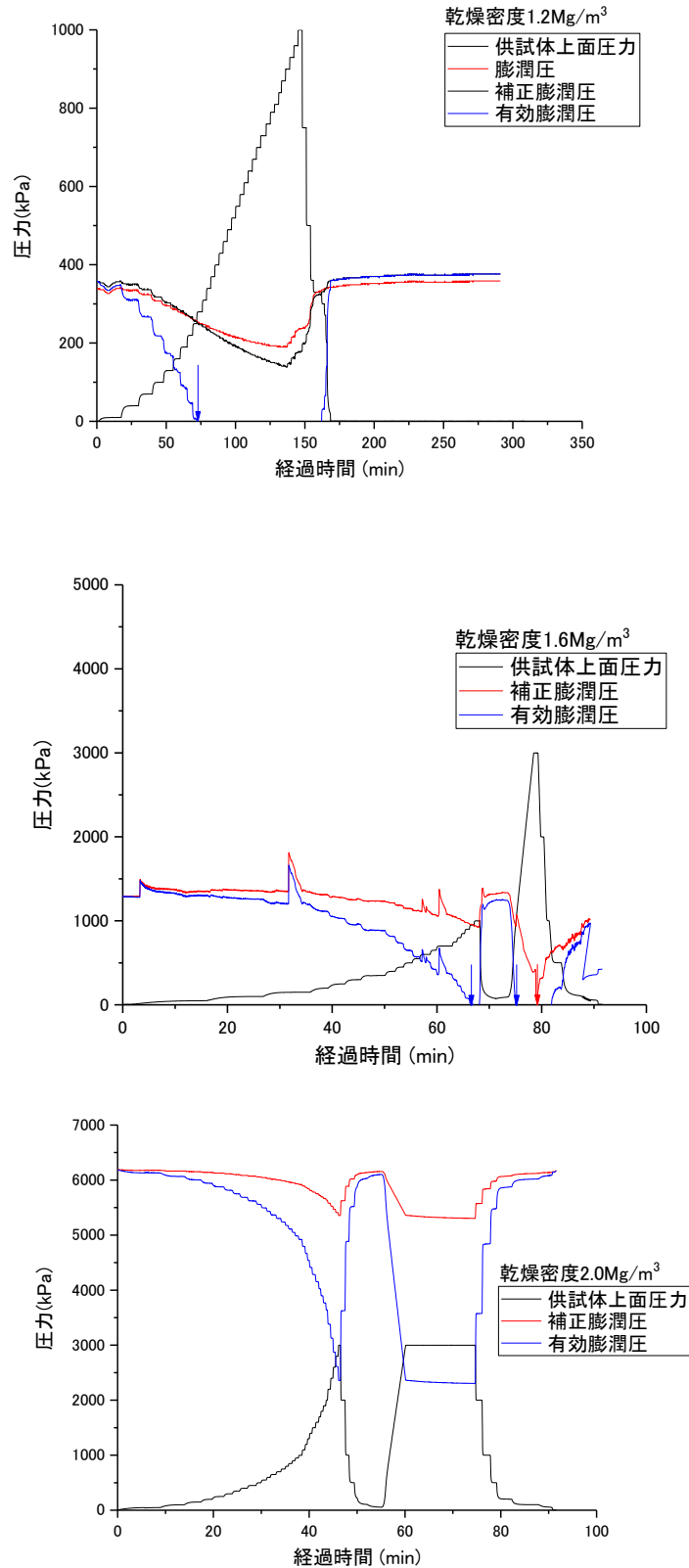


図 4.2.3-8 各乾燥密度の給水圧と膨潤圧の経時変化

図 4.2.3-9 には、試験後の供試体写真を示す。全てのケースで下面から給水して膨潤させたのにも拘らず、上面の方が柔らかくなっていた。有効膨潤圧がゼロになることによって密

度が緩んだものと考えられる。仮に、浸透圧密が起きて有効応力が増加していれば、表面が固くなるものと考えられる。

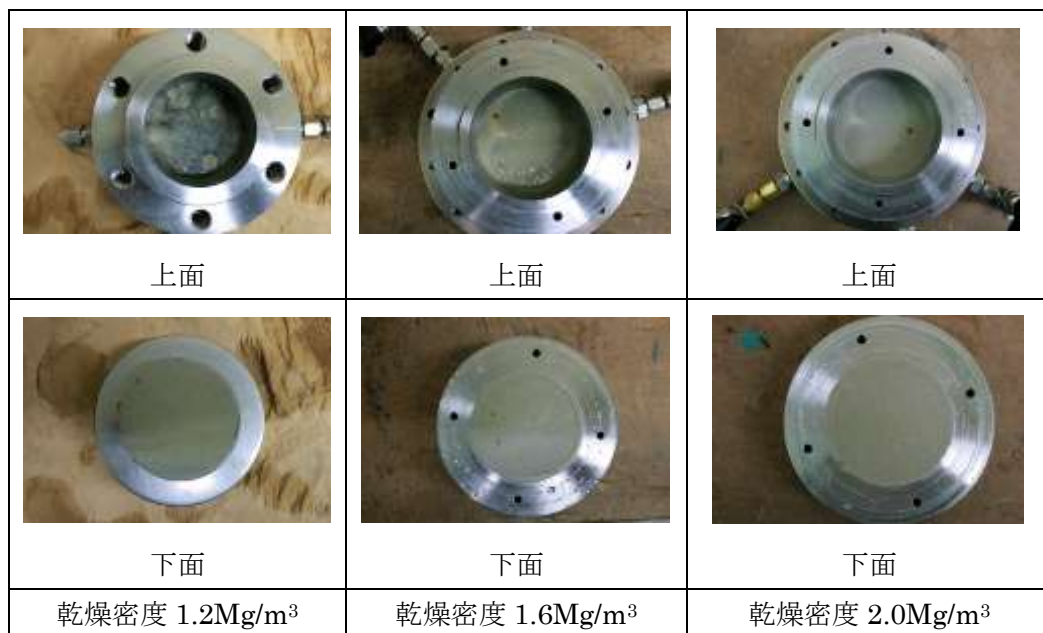


図 4.2.3-9 試験後の供試体写真

## 2) Ca 型ベントナイト

図 4.2.3-10 には、Na 型ベントナイトの各ケースと Ca 型化ベントナイトの膨潤圧の経時変化の比較を示す。図から、Ca 型化ベントナイトの膨潤圧は、同じ乾燥密度の Na 型ベントナイトの膨潤圧よりも膨潤圧が高いことが分かる。一方、同じ乾燥密度の Na 型ベントナイトに比べ、止水性能が低いために膨潤圧が定常状態になるのが早い。なお、本ケースの膨潤圧試験の初期応力も、一次元排気圧縮試験で所定の乾燥密度に締固め際の締固め圧力である。

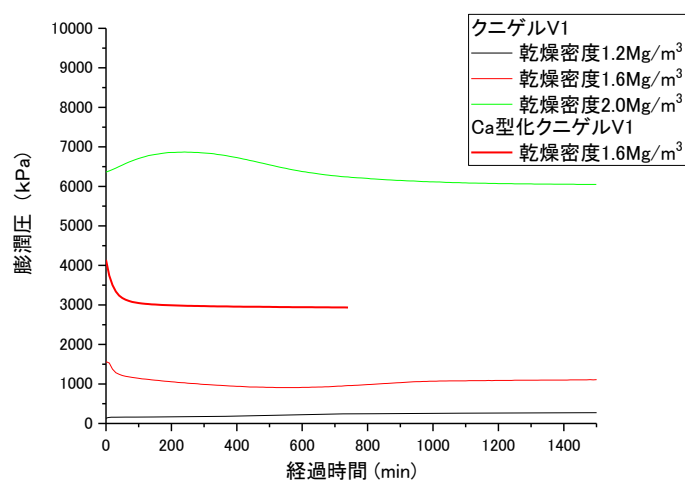


図 4.2.3-10 Na 型ベントナイトの各ケースと Ca 型化ベントナイトの膨潤圧の経時変化の比較

図 4.2.3-11 には、Ca 型化ベントナイトの給水圧と膨潤圧の経時変化を示す。Ca 型化ベントナイトでは、有効膨潤圧がゼロとなる点を青矢印で示している。本ケースでは、給水圧が 2000kPa 程度で、有効膨潤圧で定義した破過が発生する可能性がある。一方、全応力で定義した破過は給水圧が 3000kPa 程度作用しても発生しないという結果となった。これは、Ca 型化ベントナイトのケースでは、膨潤圧が高い、その一方で比較的透水係数が大きいためであると考えられる。

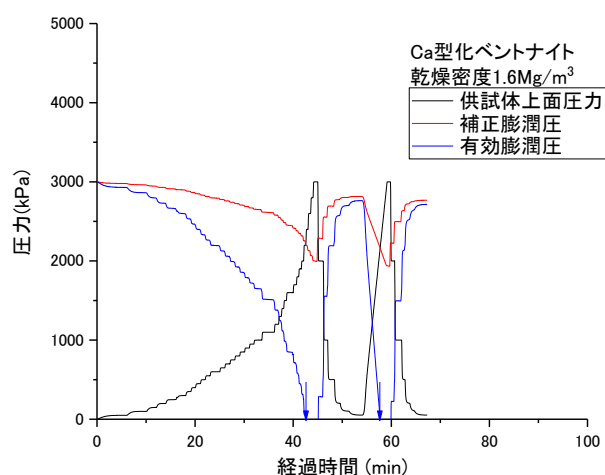


図 4.2.3-11 Ca 型化ベントナイトの給水圧と膨潤圧の経時変化

図 4.2.3-12 には、試験後の供試体写真を示す。全てのケースで下面から給水して膨潤させたのにも拘らず、上面の方が柔らかくなっていた。有効膨潤圧がゼロになることによって密度が緩んだものと考えられる。

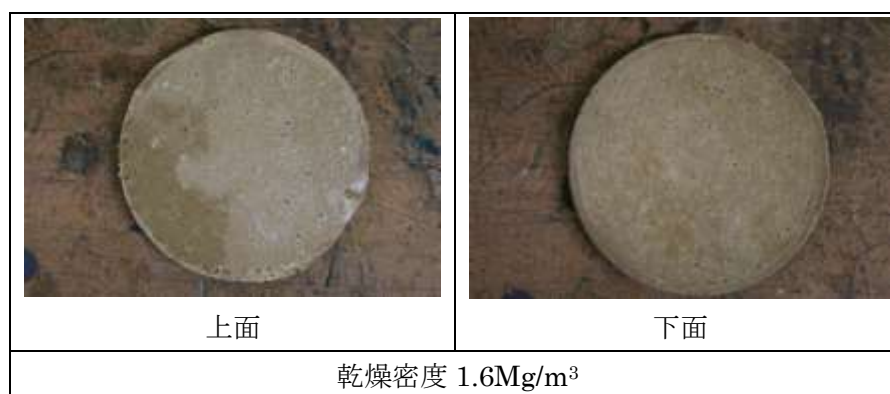


図 4.2.3-12 試験後の供試体写真

### 3) 堆積岩盤湧水模擬ケース

図 4.2.3-13 には、図 4.2.3-7 に示した Na 型ベントナイトの各乾燥密度の膨潤圧の経時変化に堆積岩変質ケースの膨潤圧の経時変化を併せて示す。図から、堆積岩変質ケースの乾燥密度は 1.6Mg/m<sup>3</sup> 程度であったが、変質の影響で平衡膨潤圧が未変質 Na 型ベントナイトで

乾燥密度  $1.2\sim 1.6\text{Mg/m}^3$  の平衡膨潤圧の間に存在している。変質前の Na 型ベントナイトに比べて膨潤圧が明確に低下しているため、前述の 1/4 リング実規模緩衝材の破過試験において破過が発生した一因ではないかと考えられる。

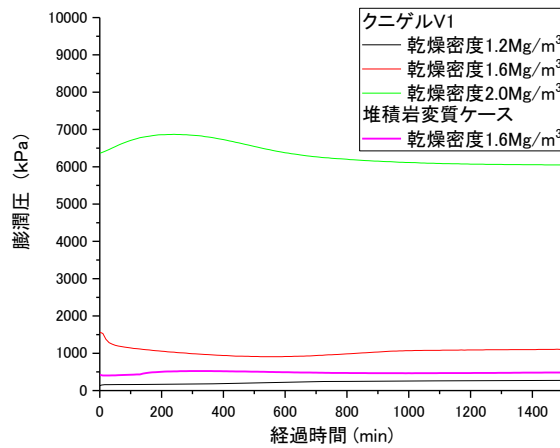


図 4.2.3-13 Na 型ベントナイトの各ケースと堆積岩変質ケースの膨潤圧の経時変化の比較

図 4.2.3-14 には、給水圧と膨潤圧の経時変化を示す。本ケースでは、有効膨潤圧がゼロとなる点を青矢印で、さらに補正後の膨潤圧がほぼゼロとなる点を赤矢印で示している。未変質の Na 型ベントナイトで乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  のケースでは、給水圧が  $1000\text{kPa}$  程度で、有効膨潤圧で定義した破過が発生する可能性があったが、本ケースでは給水圧が  $400\text{kPa}$  程度で破過する可能性があることが分かる。一方、全応力で定義した破過では、未変質の Na 型ベントナイトと同様に、給水圧が  $3000\text{kPa}$  程度で発生する可能性が高い。このことから、図 4.2.1-1 に示した、1/4 リング実規模緩衝材の破過試験で破過圧が低下した理由がベントナイトの変質によるものと考えられる。また、堆積岩のケースは最終的に変質に伴って  $150\text{kPa}$  程度で破過が発生した。境界条件が異なる為に一概に比較できないが、少なくとも有効応力で定義した破過の方が実際の試験結果と比較的整合する結果となった。

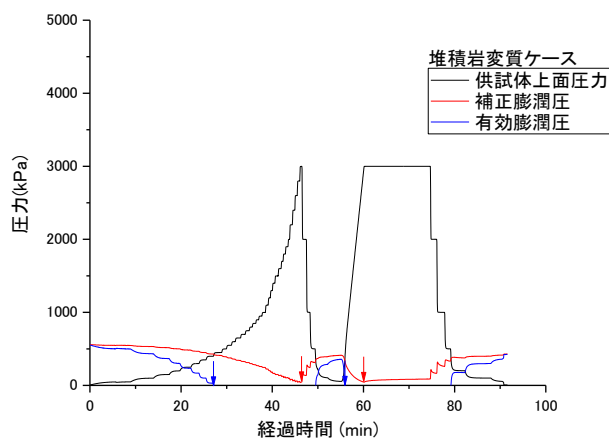


図 4.2.3-14 堆積岩変質ケースの給水圧と膨潤圧の経時変化

図 4.2.3-15 には、試験後の供試体写真を示す。全てのケースで下面から給水して膨潤させたのにも拘らず、上面の方が柔らかくなっていた。有効膨潤圧がゼロになることによって密度が緩んだものと考えられる。

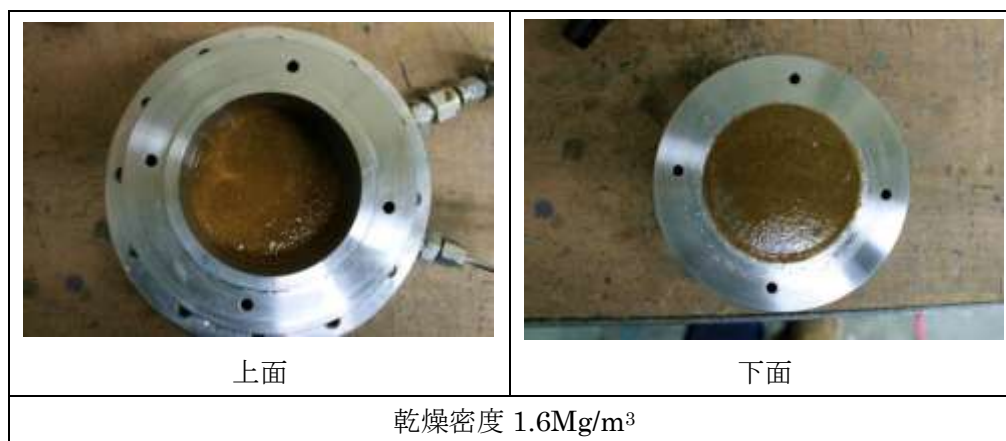


図 4.2.3-15 試験後の供試体写真

#### 4) 結晶質岩盤湧水模擬ケース

図 4.2.3-16 には、全てのケースの膨潤圧の経時変化を併せて示す。図から、結晶質岩変質ケースの乾燥密度の膨潤圧の経時変化は、堆積岩変質ケースとほぼ同等であることが分かる。これは、前述のように XRF によって、より変質が顕著な部分を選んで試験に供したために、模擬湧水環境の影響が小さくなったためと考えられる。結晶質岩変質ケースの乾燥密度も堆積岩変質ケースと同様に、 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$  程度であったが、変質の影響で平衡膨潤圧が未変質 Na 型ベントナイトで乾燥密度  $1.2\sim 1.6\text{Mg}/\text{m}^3$  の平衡膨潤圧の間に存在している。変質前の Na 型ベントナイトに比べて膨潤圧が明確に低下しているため、前述の 1/4 リング実規模緩衝材の破過試験において破過が発生した一因ではないかと考えられる。

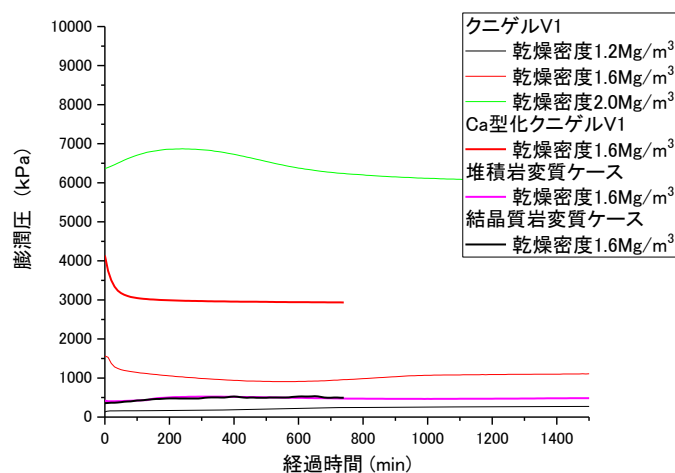


図 4.2.3-16 全てのケースの膨潤圧の経時変化の比較



図 4.2.3-17 には、給水圧と膨潤圧の経時変化を示す。本ケースでは、有効膨潤圧がゼロとなる点を青矢印で、さらに補正後の膨潤圧がほぼゼロとなる点を赤矢印で示している。未変質の Na 型ベントナイトで乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  のケースでは、給水圧が  $1000\text{kPa}$  程度で、有効膨潤圧で定義した破過が発生する可能性があったが、本ケースでは給水圧が  $500\text{kPa}$  程度で破過する可能性があることが分かる。一方、全応力で定義した破過では、未変質の Na 型ベントナイトでは給水圧が  $3000\text{kPa}$  程度で発生する可能性が高かったが、本ケースでは  $2000\text{kPa}$  で発生する可能性がある。このことから、図 4.2.1-1 に示した、1/4 リング実規模緩衝材の破過試験で破過圧が低下した理由がベントナイトの変質によるものと考えられる。また、結晶質岩のケースは最終的に変質に伴って  $250\text{kPa}$  程度で破過が発生した。境界条件が異なる為に一概に比較できないが、少なくとも有効応力で定義した破過の方が実際の試験結果と比較的整合する結果となった。

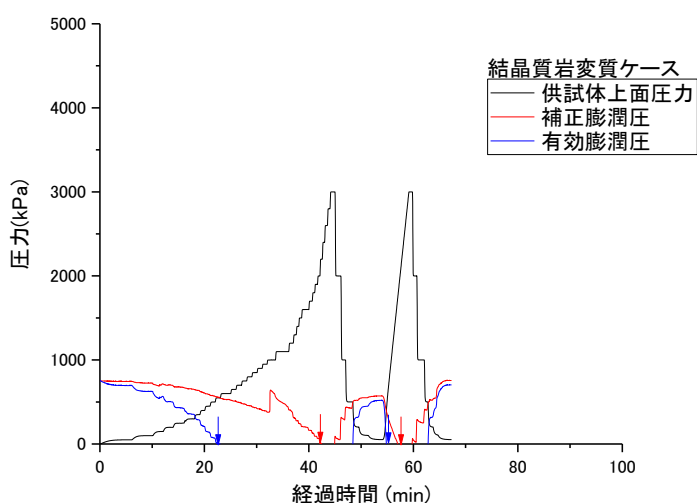


図 4.2.3-17 堆積岩変質ケースの給水圧と膨潤圧の経時変化

図 4.2.3-18 には、試験後の供試体写真を示す。全てのケースで下面から給水して膨潤させたのにも拘らず、上面の方が柔らかくなっていた。有効膨潤圧がゼロになることによって密度が緩んだものと考えられる。

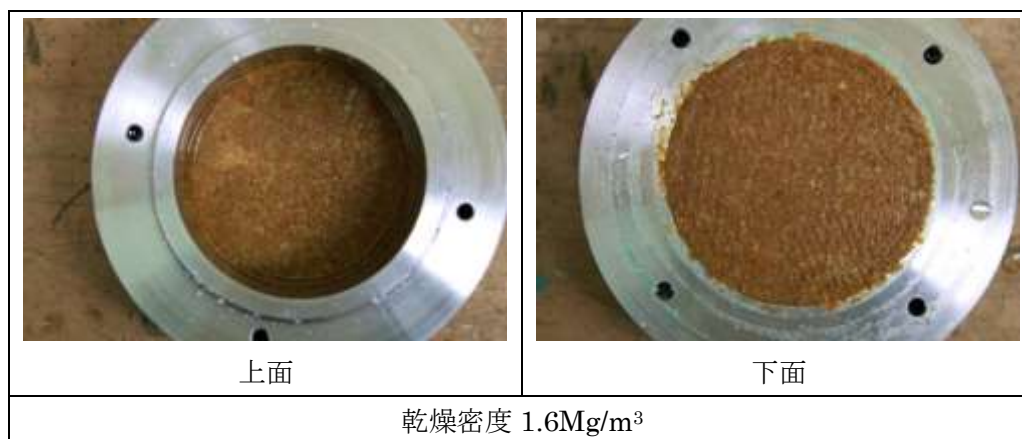


図 4.2.3-18 試験後の供試体写真

#### 第4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] 佐藤 治夫;月布産スメクタイト層間中の交換性陽イオンの定量 日本原子力学会「2007 年秋の大会」, 2007
- [3] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 25 年地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書 (第 4 分冊) ,2014
- [4] J.Wilson, G.Cressey, B.Cressey et.al, The effect of iron on montmorillonite stability. (II) Experimental investigation, *Geochimica et Cosmochimica Acta*70 ,323–336 2006

## 第5章 緩衝材の流出に関する検討

### 5.1 緩衝材表面近傍の止水性に関する室内試験

廃棄物地層処分施設は多重バリア構造を基本としており、ベントナイト系人工バリア、オーバーパックやセメント系人工バリア、天然バリアなどで囲まれた構造になっている。この異種材料界面は地層処分においては地下水の水みちとなることが懸念されているが、評価が難しいため、現状であっても性能評価上は他の部位と同等に扱われており、界面の影響は考慮されていない。界面近傍から選択的に地下水が浸潤した場合と、地下水流入位置から緩衝材深部に地下水が浸潤する場合とでは、その後に緩衝材に発生する事象や事象の順番などが異なってくるため、様々な影響が考えられる。

これまでに、SKB社では浸潤解析、およびモデル化を行っており[1]、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。また、緩衝材と天然バリアの間にはSURFACE ELEMENTと呼ばれる解析モデルを導入した検討も実施しているが、力学的な特性の表現はしているが、水理的な観点でのモデル化はなされていない。さらに、SKB社は界面の透水性評価に関して、緩衝材と天然バリアの隙間に充填するペレットにおける水みちを検討している。この水みちはペレットのような低密度緩衝材が流出によって自己シール出来ない状態で水みちとして残るものであり、一旦、水みちが生じると、緩衝材がその性能を損ねる程の量が流出することも懸念されている。

また、SKB社では、SKB社 Report R-06-80[1]やSKB社 Report R-06-72[2]において、水みちに関して実験的な検討を行っている。これらの試験内容については、平成26年度までに調査[4]している。

SKB社の既往の検討を踏まえ、本検討では、放射性廃棄物地層処分施設が再冠水する際に、地下水が緩衝材に浸潤して行く過程で発生する事象のうち、緩衝材表面近傍の止水性能評価に着目した。

HLW 処分施設や TRU 廃棄物地層処分施設は多重バリアになっており、ベントナイト系人工バリア、オーバーパックやセメント系人工バリア、天然バリアなどで囲まれた構造になっている。さらに処分施設は、建設作業時の力学的安全性の確保の観点から、天然バリアの地質によってはグラウト、ロックボルト、鋼製支保工などが施されることが予想される。このような緩衝材表面近傍は、再冠水時の水みちとなる可能性が指摘されている。

一方、ベントナイト系人工バリアの施工に着目すると、ベントナイト系人工バリアと異種材料の界面近傍の止水性能は、その施工方法によって大きく異なる。例えば、原位置施工では界面は異種材料と密着しているが、ブロック定置では隙間が存在する。その隙間にペレット充填をしても大隙間が存在するため、再冠水の初期段階では高い止水性は期待できない。

そこで本事業では、この緩衝材の施工方法を考慮して、緩衝材表面近傍の止水性に関して、ブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験による検討を行っている[4]－[6]（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[4]－[6]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。

### 5.1.1 小型セルによる緩衝材流出試験

平成 27 年度までに、緩衝材の施工方法を考慮した小型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験として原位置締固め工法を模擬して、緩衝材と異種材料が密着し、界面に隙間や大間隙がない試験条件での試験を行った[4]－[6]。緩衝材表面近傍の止水性能評価として、異種材料との界面の止水性について図 5.1.1-1 に示すような材料の組み合わせで検討を行った。

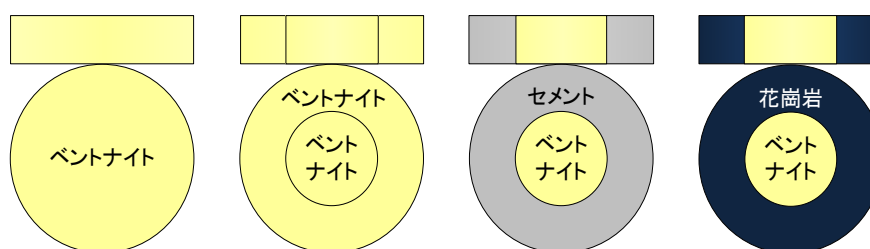


図 5.1.1-1 破過試験の試験ケース

試験を通して、パイピング現象によって生じた水みちは、発生当初は多数存在しても、時間が経過すると共に数本に収斂し、最終的には 1 つの大きな水みちになる傾向が観察された。この水みちが数本に収斂する現象は、緩衝材の仕様に大きく影響するため、図 5.1.1-2 に示すような複数の試験ケースによる確認を行った。本年度は、平成 27 年度の試験結果[6]を基に以下の試験を行った。

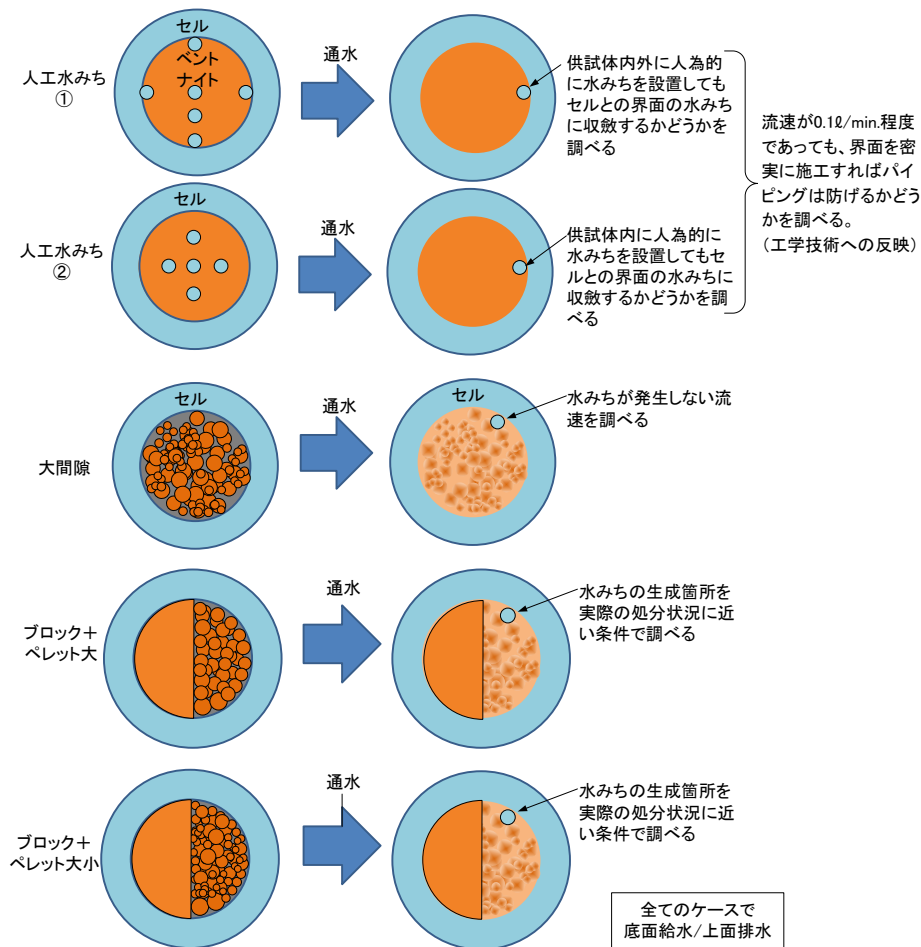


図 5.1.1-2 水みちの収斂現象の確認試験全ケースのイメージ

### (1) 試験概要

花崗岩セルを用いた試験では、透水係数が  $5 \times 10^{-12} \text{m/s}$  程度であり、試験中に花崗岩から水が滲み出てきたり、表面が湿ったりするような現象は見られなかった[6]。この結果、この程度の透水係数の壁との界面での流出現象は、従来のアクリルセルを用いた場合と比べて差異が認められなかった。そこで、緩衝材との界面の透水係数をパラメータとして、図 5.1.1-4 に示すような多孔質材料を用いた緩衝材流出試験セルを用いて試験を実施した。

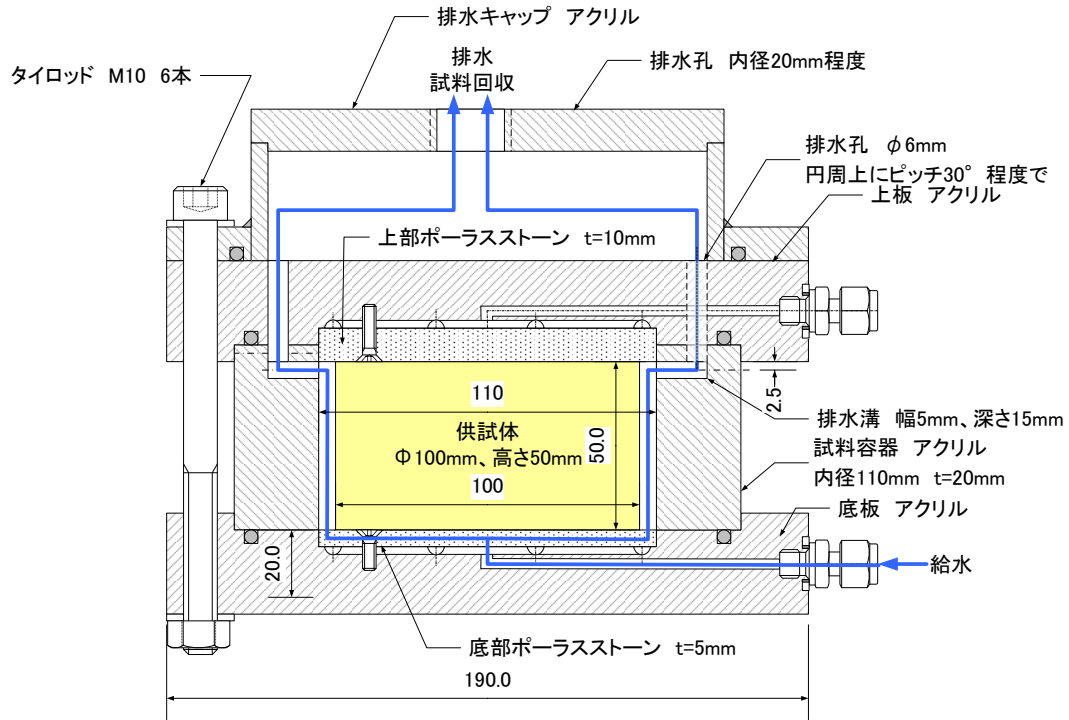


図 5.1.1-3 緩衝材流出試験セル

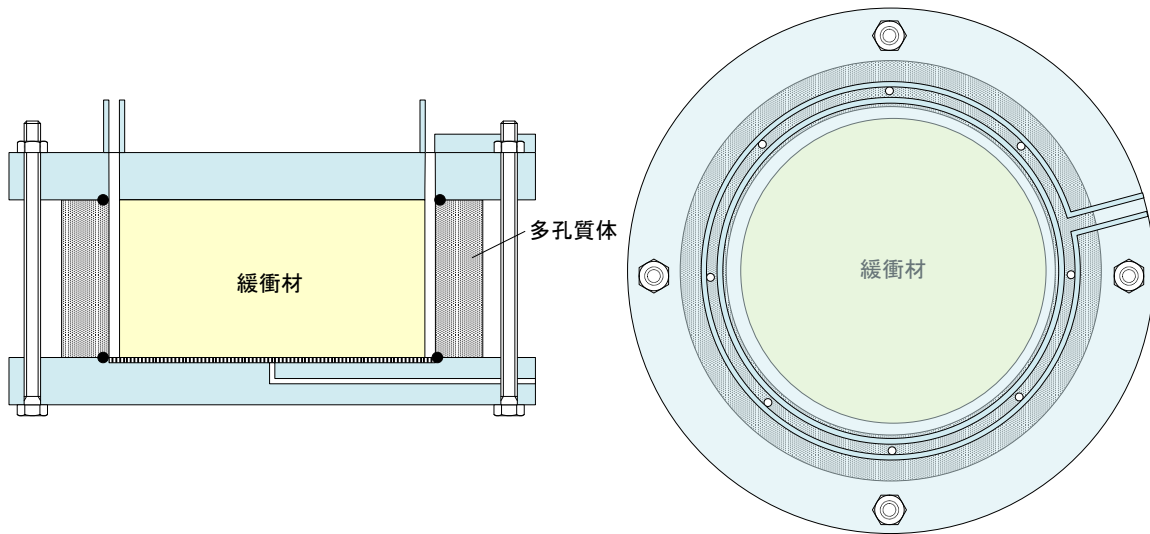


図 5.1.1-4 多孔質材料を用いた緩衝材流出試験セルの概略図

(2) 試験ケース

供試体はブロックを用い、液種は蒸留水とする。透水性をパラメータとするため、セルの側面は多孔質体とするが、材質は問わない。透水性をパラメータとするため、セルの側面は多孔質体として、その透水係数は  $10^{-8}\text{m/s}$  と  $10^{-10}\text{m/s}$  の 2 ケースとした。試験の状況を図 5.1.1-5 に示す。セルの側面が多孔質体であるため水みちの形成状況を目視観察することは困難である。表 5.1.1-1 に実施した試験ケースを示す。



図 5.1.1-5 多孔質材料を用いた緩衝材流出試験状況

表 5.1.1-1 多孔質体セルを用いた透水性と緩衝材流出の関係取得試験ケース

液種	通水方向	多孔質体の透水係数 m/s	供試体 (初期乾燥密度) Mg/m <sup>3</sup>	ケース	流速 L/min	試験数	備考
H <sub>2</sub> O	底面から 上面	10 <sup>-8</sup> 程度	ブロック (1.6)	Case1	0.1	1	
				Case2	0.01	1	
				Case3	0.001	1	
		10 <sup>-10</sup> 程度	ブロック (1.6)	Case4	0.1	1	
				Case5	0.01	1	
				Case6	0.001	1	

### (3) 試験結果（多孔質セル+蒸留水のケース）

#### 1) 透水係数 10<sup>-8</sup>m/s の多孔質セルの場合

透水係数 10<sup>-8</sup>m/s の多孔質セルとして、図 5.1.1-5 に示すようなイットリア安定化ジルコニアを用いた。この材料は、化学的に安定で、多孔質でありながら適度な引張強度を有している材料である。また、切断などの単純な加工であれば実施可能である。なお、試験に用いたイットリア安定化ジルコニア製の多孔質体の透水係数は、 $3.02 \times 10^{-8}$  m/s であった。

図 5.1.1-6 に総給水量と送水圧の経時変化を示す。図に示すように、給水は一定流量でなされており、その際の送水圧は試験開始から概ね低かった。0.01L/min の場合において一時的に送水圧が高くなっているが、送水圧が高い状態が持続することはなかった。また、試験中に多孔質セルから緩衝材や通水液が滲み出てくるような現象も観察されなかった。

図 5.1.1-7 に水みちの形成状況を示す。内部を含めて複数があった人工的な水みちは完全にシールされることはなかったが、セルとの界面に設置した 1 本の水みちが大きくなり最終的に 1 本に収斂した。



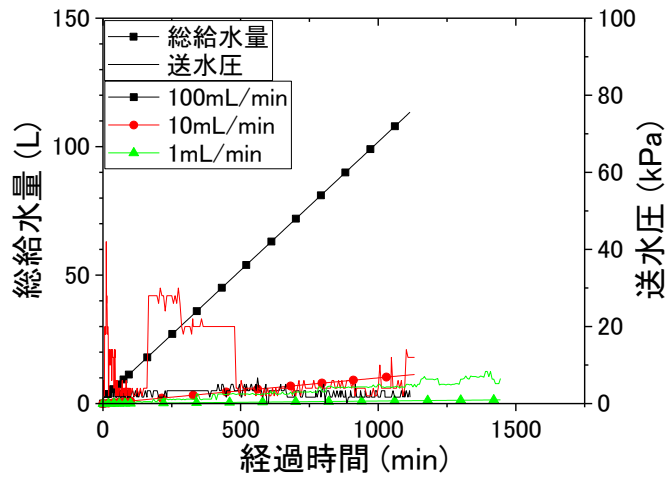


図 5.1.1-6 総給水量と送水圧の経時変化

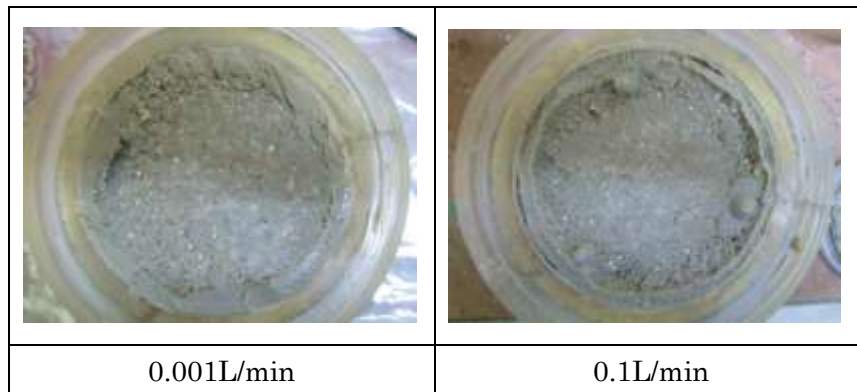


図 5.1.1-7 水みちの形成状況

2) 透水係数  $10^{-10}$ m/s の多孔質セルの場合

透水係数  $10^{-10}$ m/s の多孔質セルとして、石目を水平方向にした花崗岩を使用した。この材料は、石目に対して垂直方向の透水係数が  $10^{-12}$ m/s 程度であり、前述の花崗岩セルでの流出検討で使用したものである。なお、この多孔質体の透水係数は、 $1.27 \times 10^{-12}$ m/s であった。

図 5.1.1-8 に総給水量と送水圧の経時変化を示す。図に示すように、給水は一定流量でなされており、その際の送水圧は試験開始から概ね低かった。また、試験中に多孔質セルから緩衝材や通水液が滲み出てくるような現象も観察されなかった。

図 5.1.1-9 に水みちの形成状況を示す。内部を含めて複数があった人工的な水みちは完全にシールされることはなかったが、セルとの界面に設置した 1 本の水みちが大きくなり最終的に 1 本に収斂した。

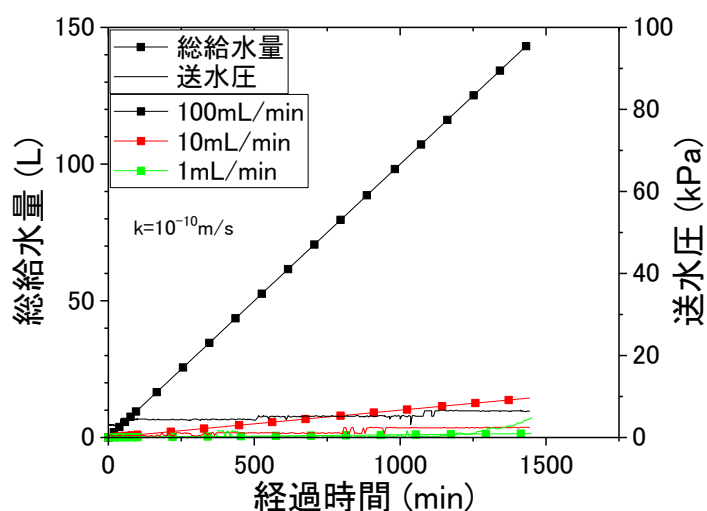


図 5.1.1-8 総給水量と送水圧の経時変化

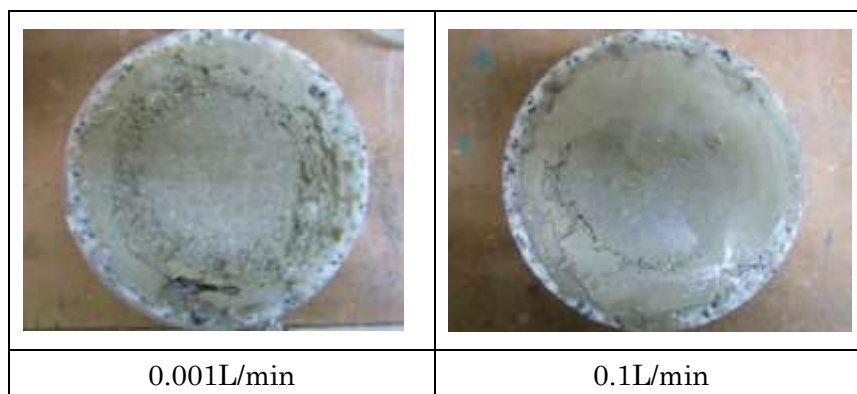


図 5.1.1-9 水みちの形成状況

3) 総流量とエロージョン質量の関係にセルの透水性が及ぼす影響

図 5.1.1-10 には、透水係数  $10^{-8}\text{m/s}$  と  $10^{-10}\text{m/s}$  の多孔質セルを用いて実施した流出試験から得られた総流量とエロージョン質量の関係を流速毎にプロットの色を揃えて示す。透水係数  $10^{-8}\text{m/s}$  の場合の結果を塗りつぶしたプロットで、 $10^{-10}\text{m/s}$  の結果を白抜きのプロットで示している。また、図には、アクリルセルを用いて取得した結果も示している。

図から、透水係数  $10^{-8}\text{m/s}$  と  $10^{-10}\text{m/s}$  の多孔質セルを用いて実施した流出試験から得られた総流量とエロージョン質量の関係は、流速毎に概ね一致しており、セルの透水性が総流量とエロージョン質量の関係に及ぼす影響は小さいという結果となった。また、総流量とエロージョン質量の関係の勾配は、アクリルセルを用いて取得した結果と概ね同等である。 $10^{-10}\text{m/s}$  の多孔質セルで  $0.001\text{L/min}$  以外のケースでは、総流量とエロージョン質量の関係が一時的に急勾配になっている。これは、今回の試験では、ブロック供試体の周辺に隙間を設けた状態で流出試験を実施しており、この隙間をブロックが膨潤してシールする際に、ブロック表面の膨潤した低密度領域が洗掘されたために一時的に流出量が増えたものと考えられる。その後の総流量とエロージョン質量の関係は、アクリルセルを用いて取

得した結果と概ね同等の勾配となっており、この時点では、水みちが1本に収斂したものと考えられる。

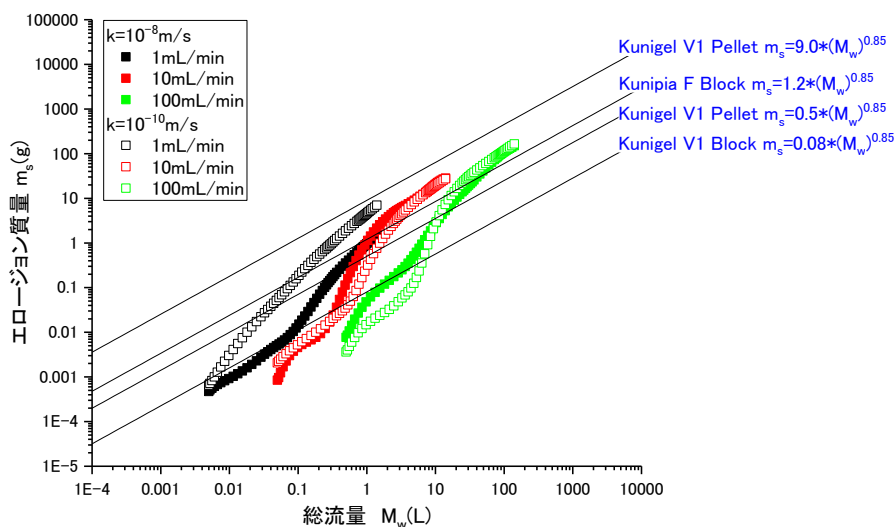


図 5.1.1-10 総流量とエロージョン質量の関係にセルの透水性が及ぼす影響

## 5.1.2 水みちの断面積と流速・乾燥密度の関係取得試験

### (1) 試験概要

処分施設における緩衝材と処分孔の界面は、岩種や施工法によって異なり、必ずしも緩衝材が孔壁に密着しているとは限らない。さらに、孔壁からは、建設作業時や閉鎖後にある程度の湧水があることが予想され、緩衝材と孔壁との界面が選択的な水みちとなることが懸念される。

これまでの研究で、緩衝材とセルの隙間の有無やペレットの使用などによって施工法を考慮した浸潤試験を実施している[4]。この結果、蒸留水の場合、流速が 0.001 L/min 以上では、緩衝材とセルの隙間やペレットの大間隙が水みちとしてパイプ状に残ることが明らかとなった(パイピング)。また、イオン強度 0.5MNaCl 水溶液の場合、0.001L/min でも水みちが形成され、同じイオン強度の CaCl<sub>2</sub> 水溶液の場合には大きな透水領域が形成されることを確認した。さらに、パイピングによって流出した緩衝材と流量の関係を取得した。

今年度は、図 5.1.2-1 に示すようなセルを用いて、流出現象をモデル化して評価するために、流出時に形成される水みちの断面積を緩衝材の乾燥密度、流量をパラメータとして取得した。図 5.1.2-2 に今回使用した水みち面積計測用セルと供試体設置状況を示す。図に示すように、人工水みちを取り囲むセルの上下盤と側面に水みち面積の計測用目盛りを設置している。水は人工水みちに対して下から上に向かって流量制御で流すこととした。図 5.1.2-3 には、試験中に得られる水みちの断面積の計測状況を示す。

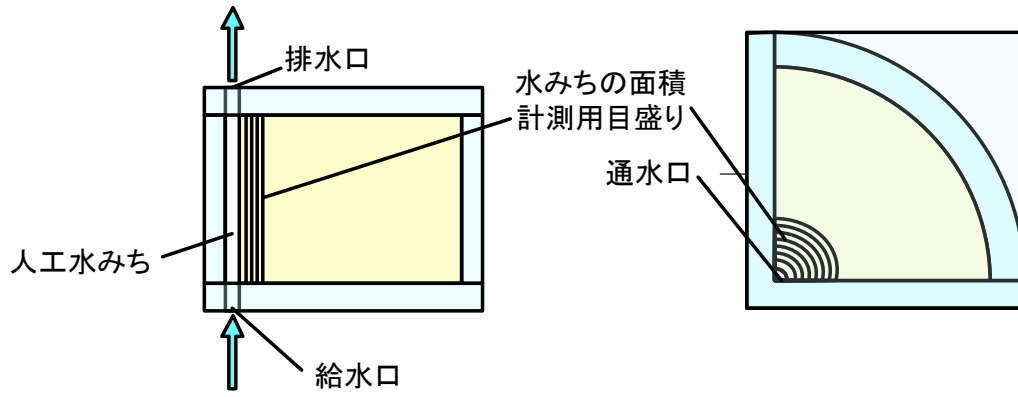


図 5.1.2-1 水みち面積計測用セルのイメージ

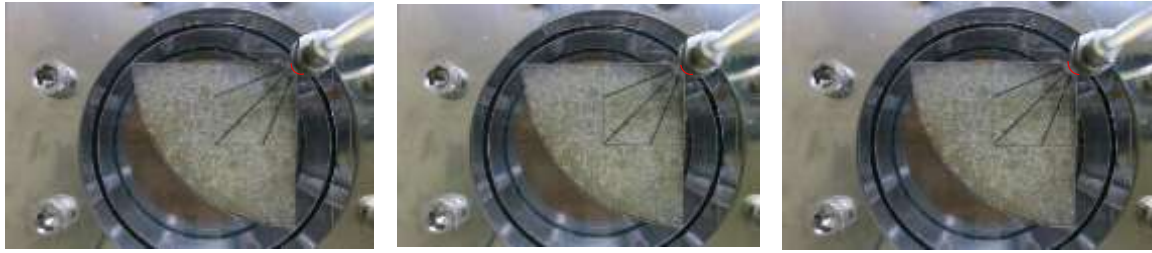


平面図

コーナー部 (水みち箇所)

側面図

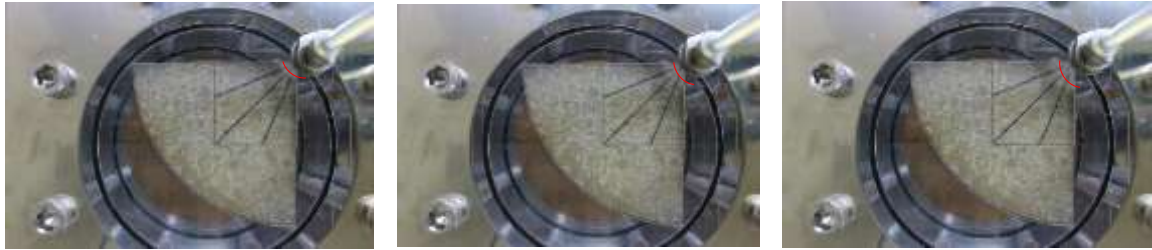
図 5.1.2-2 水みち面積計測用セルと供試体設置状況



開始直前

30 分後

1 時間



6 時間

12 時間

24 時間

平面図



開始直前

30 分後

1 時間



6 時間

12 時間

24 時間

側面図

図 5.1.2-3 水みちの断面積計測試験の状況

(2) 試験ケース

試験ケースを表 5.1.2-1 に示す。これまでの検討に基づいて、乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  と流量  $0.1\text{L/min}$  を基本として、流量  $0.1\text{L/min}$  で乾燥密度を  $1.2$ 、 $1.6$ 、 $2.0\text{Mg/m}^3$  とした場合と乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  で流量を  $0.001$ 、 $0.01$ 、 $0.1$ 、 $0.4\text{L/min}$  とした場合について試験を実施した。表 5.1.2-2 には、供試体諸元と実際の流量を示す。表に示すように、供試体は計画通り作製できていることがわかる。

表 5.1.2-1 水みちの断面積計測試験ケース

液種	通水方向	乾燥密度	流量 L/min	試験数
H <sub>2</sub> O	底面から 上面	1.2	0.1	1
		1.6		1
		2.0		1
		1.6	0.001	1
			0.01	1
			0.4	1

表 5.1.2-2 水みちの断面積計測試験の供試体諸元と実際の流量

乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	1.200	1.600	2.000	1.600	1.600	1.600
平均送水流量 (L/min)	0.1	0.1	0.1	0.001	0.01	0.4
体積 (cm <sup>3</sup> )	783.435	783.435	783.435	783.435	783.435	783.435
含水比 (%)	41.79	23.24	11.76	23.04	22.82	22.79
乾燥質量 (g)	1253.50	1253.50	1253.50	1253.50	1253.50	1253.50
間隙比 (-)	1.256	0.692	0.353	0.692	0.692	0.692
飽和度 (%)	90.08	90.96	90.13	90.15	89.32	89.18

(3) 試験結果

図 5.1.2-4 に送水圧と送水量の経時変化を示す。図から、流量が  $0.1\text{L/min}$  では乾燥密度が大きいほど送水圧の変動する傾向が見られる。また、乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  では、流量が小さい方が送水圧が変動する傾向が見られる。この変動は、どちらも緩衝材の膨潤によるものだと考えられる。

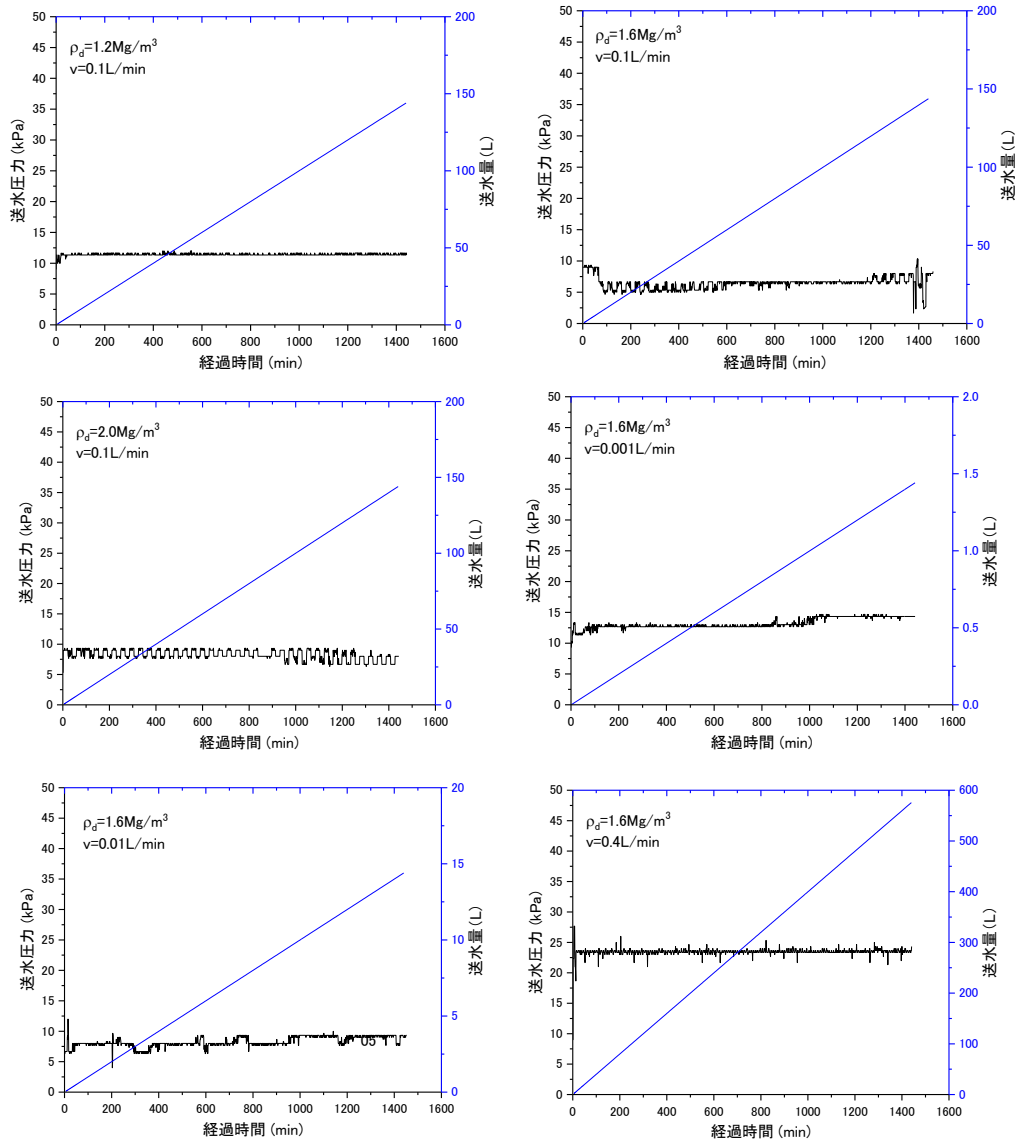


図 5.1.2-4 送水圧と送水量の経時変化

図 5.1.2-5 には、定点撮影から得られた人工水みちの断面積の変化の状況を示す。人工水みちの断面積は、水みちの断面形状として 1/4 の楕円形を仮定して、側面の目盛りの読み値から算出した。図に示すように、流量が 0.1L/min の場合、緩衝材は、乾燥密度に依らず、通水初期は若干膨潤して断面積が小さくなるが、その後はエロージョンによって断面積が大きくなっているのがわかる。また、乾燥密度が小さいほど断面積が大きくなる（流出が激しい）傾向があることが分かる。一方、乾燥密度が 1.6Mg/m<sup>3</sup> の場合、流量が 0.001、0.01L/min では膨潤によって水みちの断面積は小さくなり、0.1、0.4L/min では断面積は大きくなる結果となった。図 5.1.2-6 には、エロージョンに伴う人工水みちの断面積変化によって変化する水みちを流れる水の速度の経時変化を示している。図に示すように、試験開始直後は断面積が小さくなった分だけ流速が大きくなるが、その後、断面積が広がりながら流速が小さくなり収束する傾向がみられる。ただし、本試験期間内では流速が収束するまで十分に試験を実施できなかったため、図 5.1.2-7 に示すように試験結果をフィッティングしてその関数の



収束値も取得した。フィッティング関数は下式の通りであり、水みちでの流速 $v$ 、乾燥密度 $\rho_d$ に対して、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $V_r$ をパラメータとして機械的にフィッティングした。なお、 $V_r$ が水みちでの流速の収束値に当たる。

$$V = a \exp\left(-\frac{\rho_d}{t_1}\right) + b \exp\left(-\frac{\rho_d}{t_2}\right) + c \exp\left(-\frac{\rho_d}{t_3}\right) + V_r$$

図 5.1.2-8 には、乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>の緩衝材の流速毎の平衡値を示す。図には、上記関数によってフィッティングして求めた平衡値も併せて示している。図から、外挿して求めた平衡値が正しいとすれば、ある程度の流速以上では水みちでの流速の平衡値はほぼ一定になると言える。図 5.1.2-9 には、流量 0.1L/min の場合の乾燥密度ごとの緩衝材の限界流速を示す。図には、図 5.1.2-8 と同様に、フィッティングして求めた平衡値も併せて示している。図から、外挿して求めた平衡値が正しいとすれば、流量が 0.1L/min の場合、ある程度乾燥密度以上では、水みちでの流速の平衡値はほぼ一定になると言える。

本試験では、機械的に試験時間を最大で 1 日として決定したため、平衡値を実験から求めることができなかった。今後、同様の手法で、長時間の試験を実施すれば、乾燥密度毎の限界流速を取得することができる。今後の課題である。

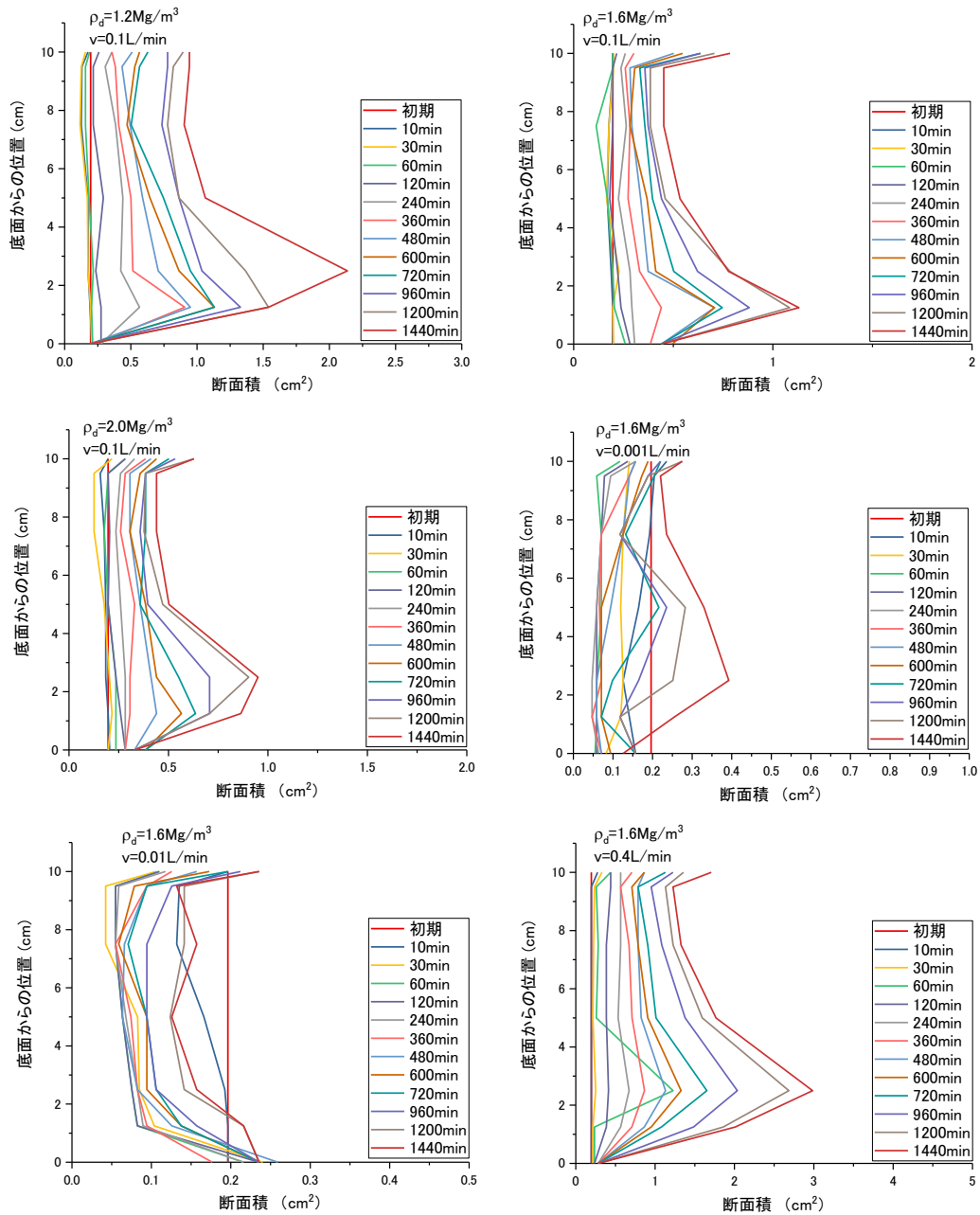


図 5.1.2-5 エロージョンに伴う人工水みちの断面積変化

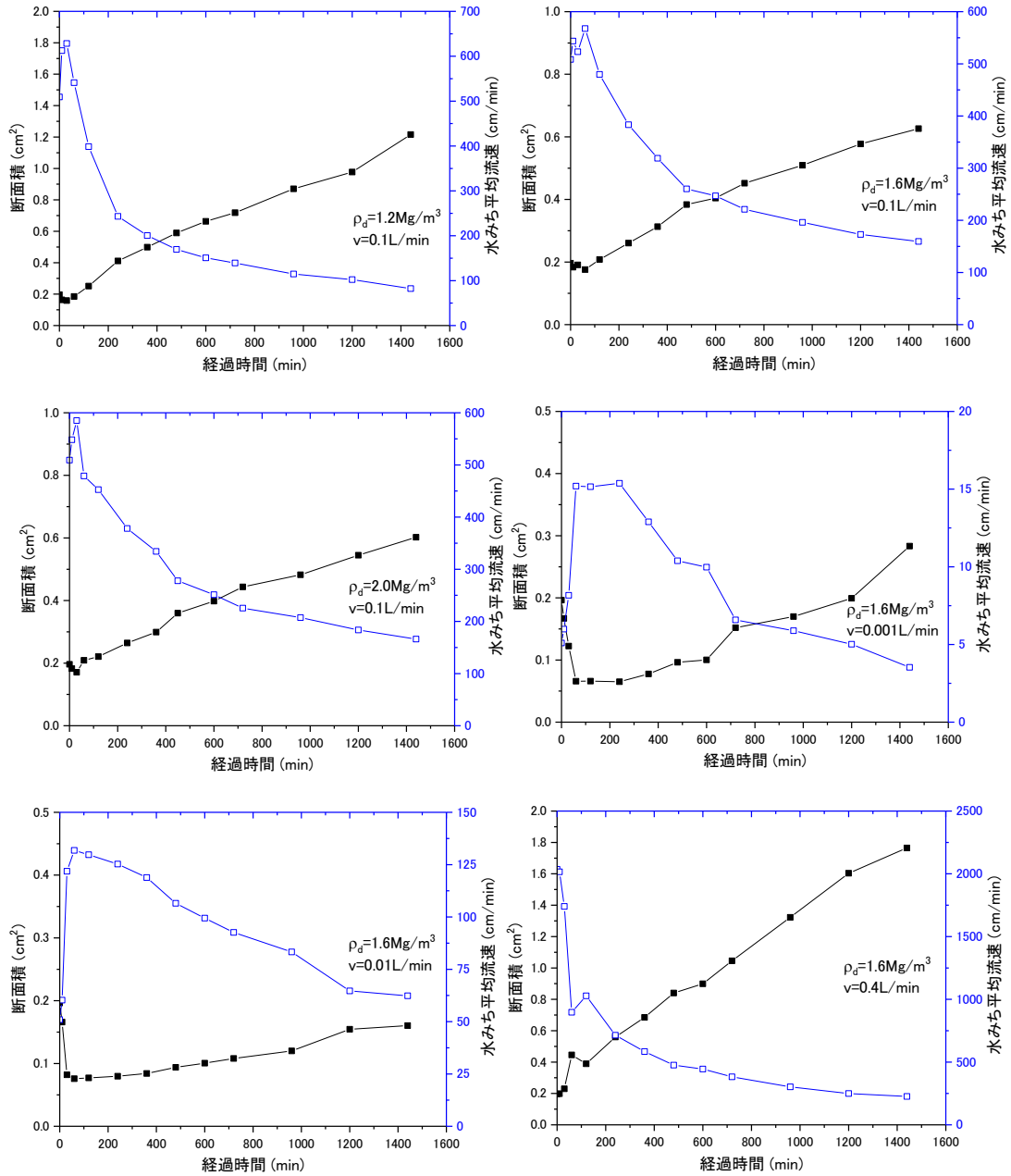


図 5.1.2-6 人工水みちの断面積変化に伴う流速の経時変化

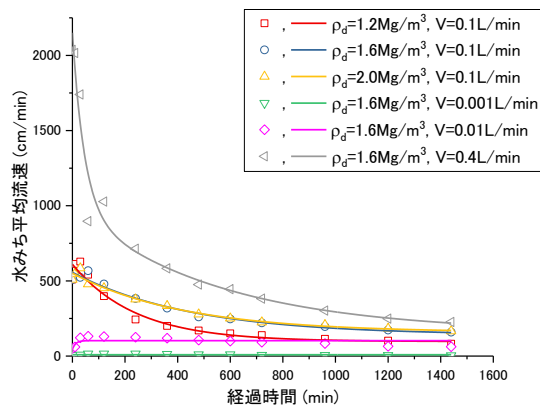


図 5.1.2-7 人工水みちの断面積変化に伴う流速の平衡値の推定

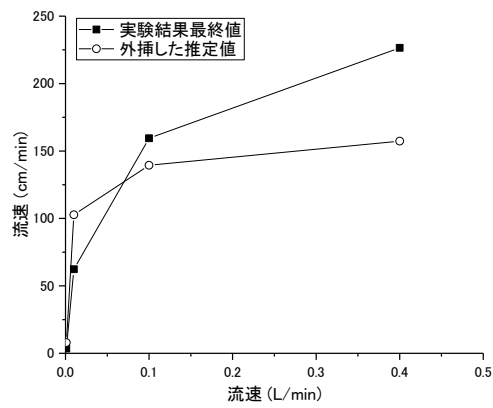


図 5.1.2-8 乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup> の緩衝材の流速毎の平衡値

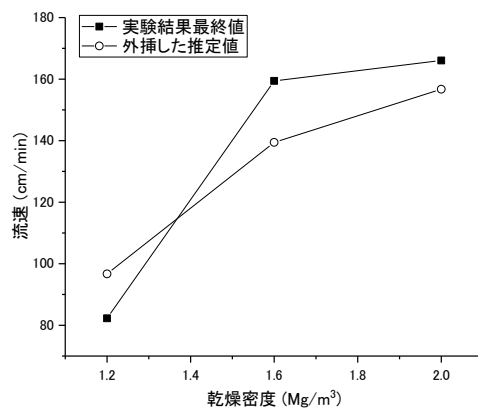


図 5.1.2-9 流速 0.1L/min の場合の乾燥密度ごとの緩衝材の限界流速

## 5.1.4 工学規模パイピング・エロージョン試験

### (1) 試験概要

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(パイピング)、浸食(エロージョン)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。そこで、本事業では、前述のように小型セルによる試験でパイピングやエロージョン現象について検討を行った。

小型セルによる試験で明らかになった現象は、主に緩衝材と異種材料の界面に発生した水みち内で発生しており、小規模試験といえども供試体寸法は水みちよりも十分に大きいため、これらの現象が試験規模に及ぼす影響は小さいものと考えられるが、確認が必要である。さらに、前述の小規模試験では、複雑な境界条件を考慮することが困難であったため、給水位置と数(鉛直方向と水平方向)、処分孔の不陸、ペレットの粒径、エロージョン対策の効果などの検討には適さないと考えられる。

そこで、小規模試験よりスケールアップした工学規模試験において、試験規模の影響評価、実際の処分孔を模擬した境界条件下でのパイピング・エロージョン現象の発生状況観察や発生条件の検討、さらにエロージョンのモデル化を行った。図 5.1.4-1 に工学規模パイピング・エロージョン試験セルのイメージを、図 5.1.4-2 には工学規模パイピング・エロージョン試験セルの写真を示す。

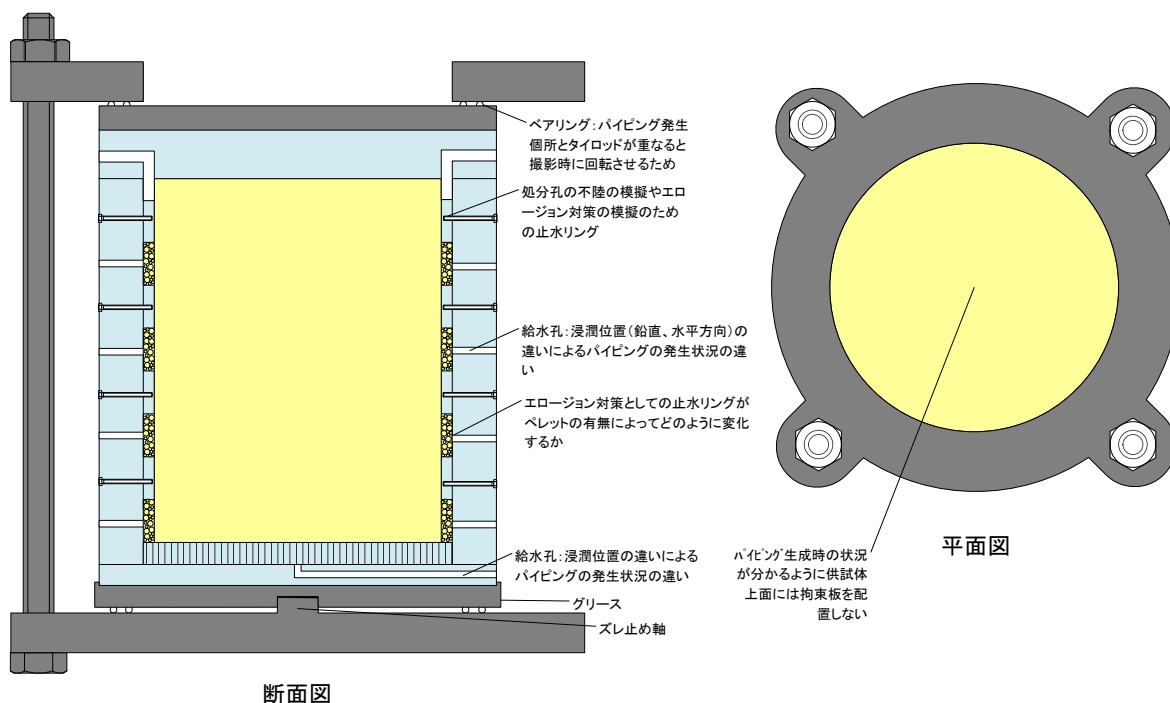


図 5.1.4-1 工学規模パイピング・エロージョン試験セルのイメージ

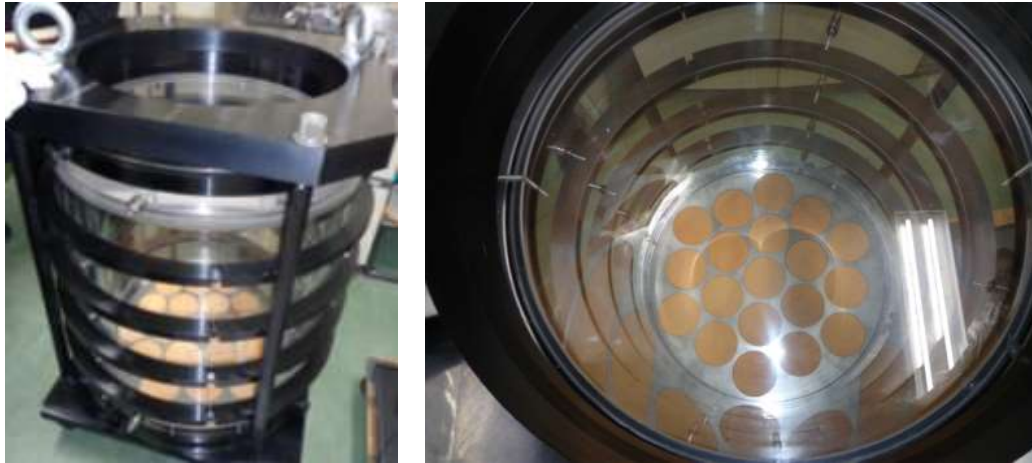


図 5.1.4-2 工学規模パイピング・エロージョン試験セル

(2) 試験ケース

今年度は、前述の小型セルによる試験との比較し、エロージョンに対する工学的対策として隙間にペレットを充填する方法の有効性について検討を行った。試験ケースを表 5.1.4-1 に示す。供試体とセルの間の隙間は 30mm のリング状であり、水はこの隙間を側部下面から上面の排水孔に向かって流れる。この際の流速は、シリンジポンプで 0.1L/min となるように制御した。排水孔は 5 mm のパイプ状であり、90° 毎に 1 カ所、合計 4 カ所設けた (図 5.1.4-1 参照)。

表 5.1.4-1 工学規模パイピング・エロージョン試験ケース

試験ケース	液種	通水方向	供試体	流速 (L/min)	試験数	試験項目	備考
ペレット充填	蒸留水	側面下部から上面	膨潤後の平均乾燥密度 1.6Mg/m <sup>3</sup> 程度のブロック 寸法： φ 500 mm × h600 mm	0.1	1	通水圧 エロージョン量 (濁度) パイピング・エロージョン挙動の観察	新規セル内径： 560 mm 高さ： 600 mm

(3) 試験結果

1) 試験状況

図 5.1.4-3 にペレット充填供試体の作製工程を示す。図に示すように、先ず緩衝材ブロックを積層してアクリルセルを被せ、アクリルセルと緩衝材の間の幅 30mm の隙間をペレットで充填した。ペレットは最大粒径 20mm 程度の大粒径ペレットを千鳥配置させ、その間を小粒径ペレットで充填し突き固めるという方法を 1 層ごとに行った。これにより、ペレット部の乾燥密度は 1.469 Mg/m<sup>3</sup> となった。

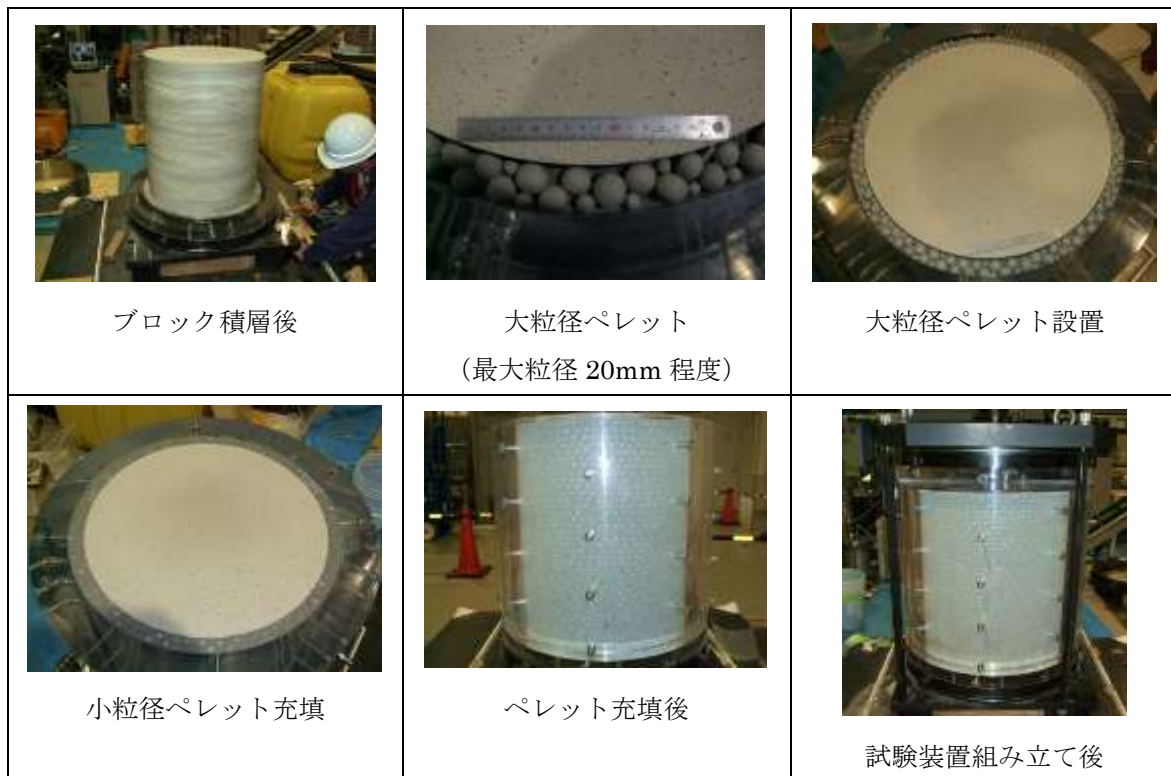


図 5.1.4-3 ペレット充填供試体の作製工程

図 5.1.4-4 には、総流量と給水圧の経時変化を示す。図には人工不陸のケースも併せて示している。図から、ペレット充填ケースでは、給水圧が給水開始直後から 500kPa 程度まで増加し、その後漸減し、30kPa 程度で推移しているのに対して、人工不陸のケースでは、給水開始から 15 日程度経ってから急激に給水圧が増加しているのが分かる。これは、ペレット充填ケースでは、給水前から通水可能な断面積が小さいのに対して、人工不陸のケースでは、緩衝材が膨潤しなければその効果が発揮されないためである。このことから、実処分孔では、閉鎖直後はペレットが効果的であり、ある程度緩衝材が膨潤してからは人工不陸が効果的である可能性がある。仮に人工不陸とペレット充填を併用すれば、緩衝材のエロージョン現象に対して相乗効果が期待できると考えられる。



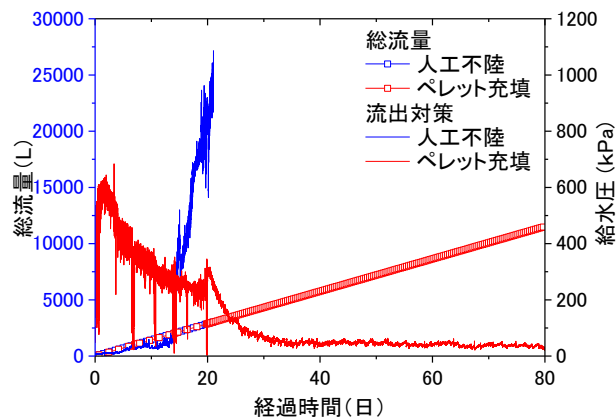


図 5.1.4-4 総流量と給水圧の経時変化

図 5.1.4-5 には、試験装置上面の膨潤状況を示す。上面には、給水開始から約 50 分で浸潤箇所が到達した。その後、ペレット部が先行して浸潤している状況がわかる。なお、ブロック部の上面の一部が浸潤しているように見えるが、ブロック上面とセルの上蓋にわずかに隙間があった為であり、内部まで水が浸透しているわけではない。また、時間経過に伴って水みちが変遷しているが、セルとの界面だけでなく、一時的にブロック部とペレット部の界面に水みちが形成されている状況が確認できた。

最終的に試験は約 180 日間実施したが、水みち周辺のみが膨潤し、他の部分は試験開始数日後の状態から乾燥するような状況であった。



図 5.1.4-5 工学規模パイピング・エロージョン試験状況 (上面)

図 5.1.4-6 には側面の膨潤状況を示す。写真から、浸潤部が上面に到達した給水開始から 50 分後でも、ペレット部には乾燥領域が存在していることが分かる。ペレット部では、飛び石状に浸潤領域が形成され、各浸潤領域がつながっていくような形で浸潤領域が拡大した。水みちは、不規則に様々な箇所に変遷したが、最終的には、給水箇所から上向きに最短距離の排水箇所に向かって水みちが形成された。水みちは非常に細いため、給水圧は他のケースと比較して試験当初から 500kPa 程度と高めである。これは、ペレットを充填したことにより、バルクの乾燥密度が他のケースよりも大きく、膨潤圧が高いためであると考えられる。

最終的に試験は約 180 日間実施した。水みちは徐々に大きくなり、それに伴って給水圧は低下した。

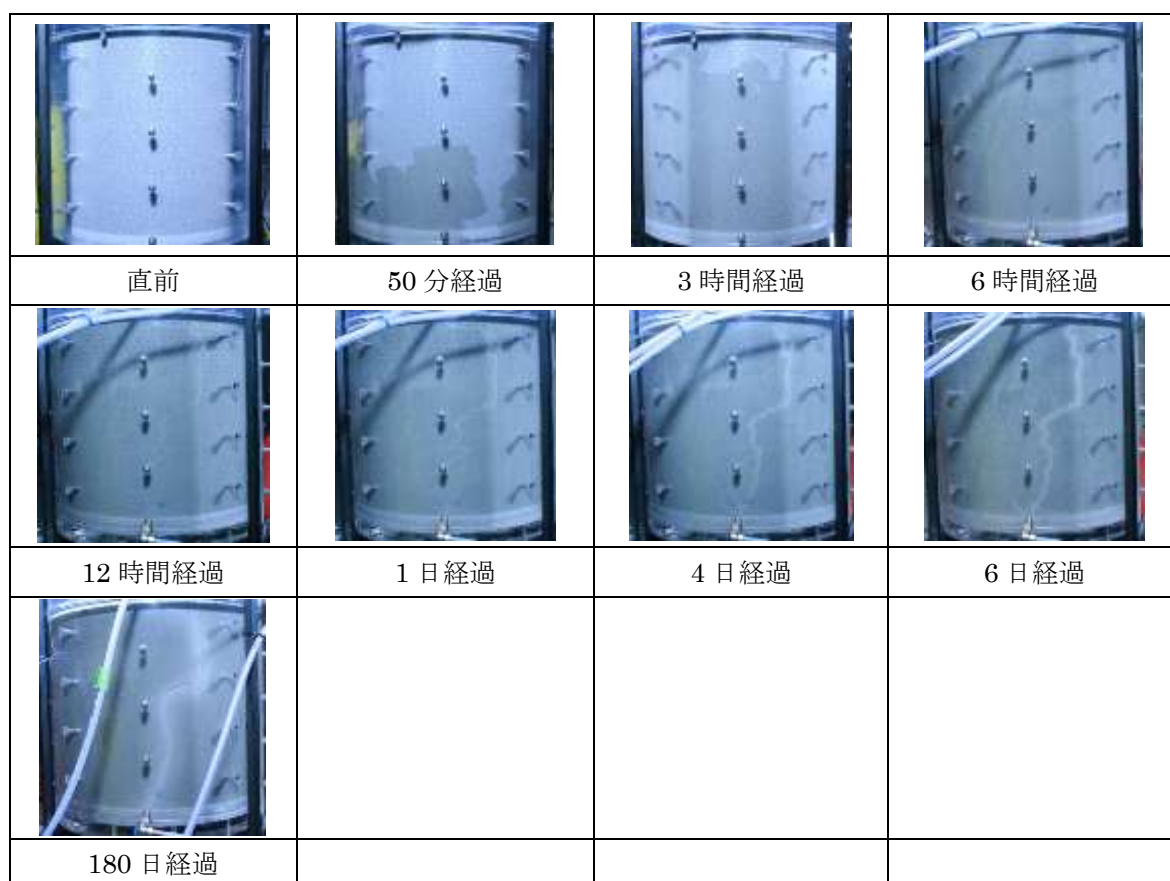


図 5.1.4-6 工学規模パイピング・エロージョン試験状況（側面）

図 5.1.4-7 には、エロージョン量と給水量の関係を示す。図には比較のために、他のケースも併せて示している。ペレットのケースは、他のケースに比べ、同じ給水量に対してエロージョン量が多いが、これは他の試験ケースに比べ、隙間の容積が小さいため、少量の給水量から流出が始まったためであると考えられる。逆に言えば、他のケースでは試験装置の隙間の容積が大きいため、隙間を水で満たす分に加えて隙間がある程度膨潤に

よって狭まり流速が増加するまでの間に給水された分だけ、流出開始までに必要な注水量が大きくなり、試験結果が右方向にシフトしたものと考えられる。

さらに、ペレットのケースは、他のケースに比べてエロージョン量と給水量の関係の勾配が緩いことがわかる。このことは、緩衝材の流出に対する長期的な抑制対策としてペレット充填が効果的であることを意味している。

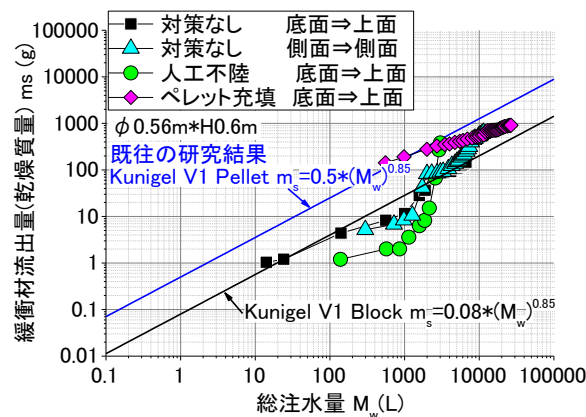


図 5.1.4-7 エロージョン量と給水量の関係

## 2) 解体状況

図 5.1.4-8 に工学規模エロージョン試験の解体時のサンプリング位置を示す。サンプリングは 2 つの直交する断面から面状に分布が得られるように実施して、ペレット部も採取した。図には、給排水箇所も示している。B・D 断面の B 側下部から給水し、上面から排水している。

図 5.1.4-9 には、乾燥密度分布を示す。給水箇所のある B 側下部は乾燥密度が小さくなっていることが分かる。給水中、常に水の流れがあり、水みちも形成されていたため、流出と膨潤が継続的に生じていたためであると考えられる。また、水みちが形成されていた箇所 (B 側) は、概ね、乾燥密度の低下が観察された。

図 5.1.4-10 には、飽和度分布を示す。乾燥密度が低下している箇所は、飽和度の増加が顕著であり、概ね飽和している状況であった。無対策のケースに比べてペレット充填のケースの飽和度分布は、全体的に飽和度が低い。これは、ペレット部分が水を含んで先に膨潤し、ブロックへの水の供給は、この膨潤したペレットを介して行われるためであると考えられる。ペレットを充填することで膨潤を非常に緩やか、かつ均等にする効果が期待できる。

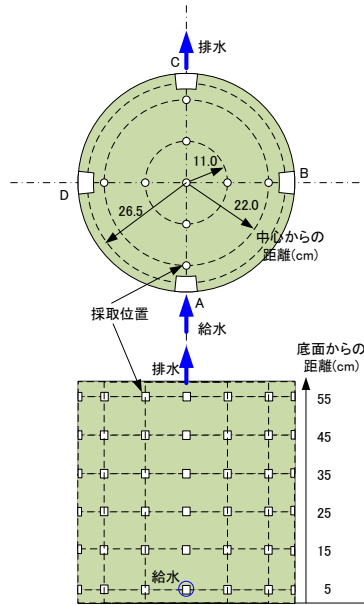


図 5.1.4-8 工学規模エロージョン試験のサンプリング位置

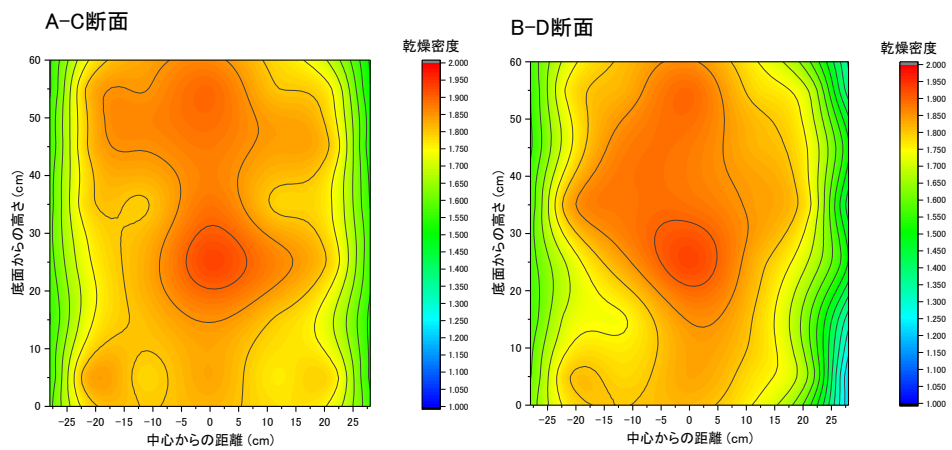


図 5.1.4-9 工学規模エロージョン試験の解体結果（乾燥密度分布）

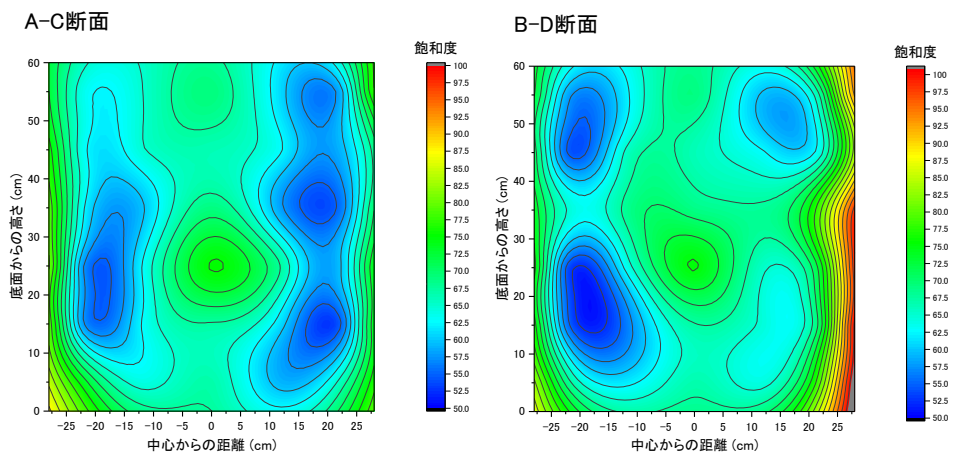


図 5.1.4-10 工学規模エロージョン試験の解体結果（飽和度分布）

### 5.1.5 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た。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 5.1.5-1 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する。表 5.1.5-1 に本年度実施する試験ケースを示す。

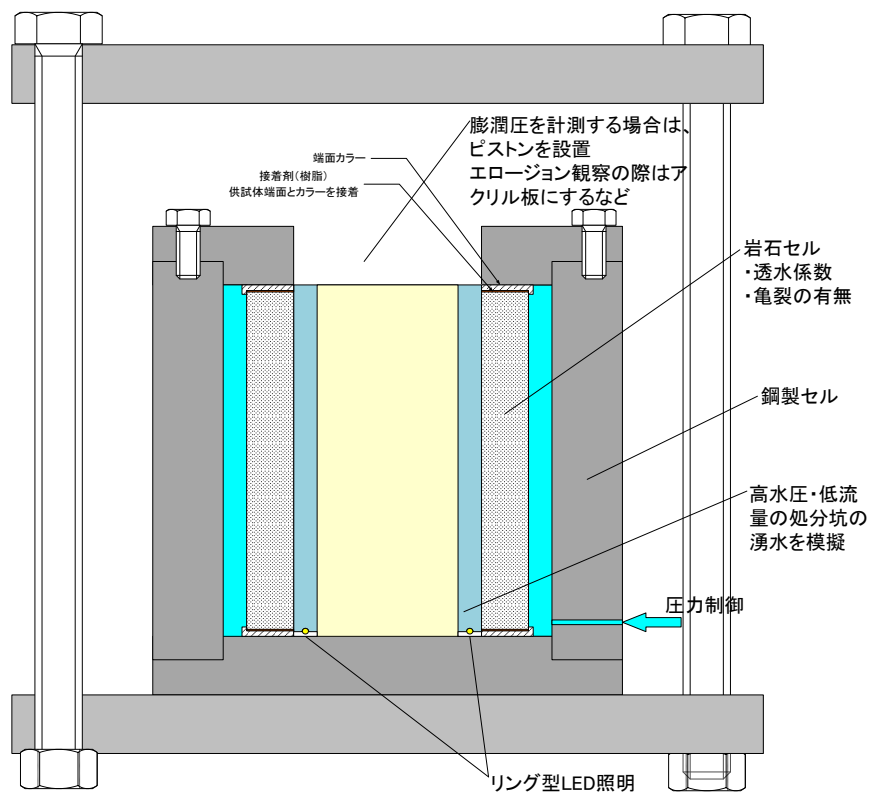


図 5.1.5-1 2 重セルを用いた圧力一定通水試験イメージ



## (2) 試験ケース

表 5.1.5-1 に本年度実施する試験ケースを示す。

表 5.1.5-1 圧力一定条件下での緩衝材流出試験ケース

目的	状態	液種	外圧	内圧	内セル	供試体	試験数	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	新規	H <sub>2</sub> O	1~3MPa程度	大気圧相当	多孔質体 透水係数 10 <sup>-8</sup> m/s 相当	膨潤後の平均乾燥 密度 1.6Mg/m <sup>3</sup> 程 度のブロック	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>・通水圧</li> <li>・ベントナイト流出量</li> <li>・流量</li> <li>・挙動の観察</li> </ul>

図 5.1.5-2 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。写真に示すように、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 5.1.5-2 (a)に見える格子状のリブの表面に多孔質板が設置され、多孔質板に高水圧を付与したさいに多孔質板から滲み出る水（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する。多孔質板は、透水係数 10<sup>-10</sup>m/s 程度で厚さが 10mm とすると、3MPa の通水圧で流量が概ね 0.1L/min となるため、前述の透水係数 10<sup>-10</sup>m/s の花崗岩セルと同様の材料を用いることとした。

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 5.1.5-2 (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 5.1.5-2 (c))。



(a) 試験セル

(b) 載荷板、ロードセルと反力盤

(c) 水密試験

図 5.1.5-2 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 5.1.5-3 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 5.1.5-3 (a)の 2000 kN アムスラーを用いて作製した。1つのブロックにつき、図 5.1.5-3 (b)~(f)の手順を繰り返した。

図 5.1.5-4 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め固めて作製した。供試体と多孔質体の隙間は左右とも 30mm 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<sup>3</sup> 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 5.1.5-2 に示す。

表 5.1.5-2 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	締固め層毎			ブロック毎				全体			
	層 No	湿潤質量 (g)	含水比 (%)	乾燥質量 (g)	体積 (cm <sup>3</sup> )	乾燥 密度 (g/cm <sup>3</sup> )	膨潤時 体積 (cm <sup>3</sup> )	膨潤時 乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	膨潤時 体積 (cm <sup>3</sup> )	乾燥 質量 (g)	膨潤時 乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )
1	1	1416.77	10.82	1278.46	10500	1.826	12000	1.598	48000	76777.80	1.600
	2	1416.77	10.82	1278.46							
	3	1416.77	10.82	1278.46							
	4	1416.77	10.82	1278.46							
	5	1416.77	10.82	1278.46							
	6	1416.77	10.82	1278.46							
	7	1416.77	10.82	1278.46							
	8	1416.77	10.82	1278.46							
	9	1416.77	10.82	1278.46							
	10	1412.47	10.55	1277.69							
	11	1412.47	10.55	1277.69							
	12	1412.47	10.55	1277.69							
	13	1412.47	10.55	1277.69							
	14	1412.47	10.55	1277.69							
	15	1412.47	10.55	1277.69							
2	1	1412.47	10.55	1277.69	10500	1.828	12000	1.600	48000	76777.80	1.600
	2	1412.47	10.55	1277.69							
	3	1419.51	10.87	1280.29							
	4	1419.51	10.87	1280.29							
	5	1419.51	10.87	1280.29							
	6	1419.51	10.87	1280.29							
	7	1419.51	10.87	1280.29							
	8	1419.51	10.87	1280.29							
	9	1419.51	10.87	1280.29							
	10	1419.51	10.87	1280.29							
	11	1419.51	10.87	1280.29							
	12	1414.07	10.49	1279.78							
	13	1414.07	10.49	1279.78							
	14	1414.07	10.49	1279.78							
	15	1414.07	10.49	1279.78							
3	1	1414.07	10.49	1279.78	7000	1.829	8000	1.600	48000	76777.80	1.600
	2	1414.07	10.49	1279.78							
	3	1414.07	10.49	1279.78							
	4	1414.07	10.49	1279.78							
	5	1414.07	10.49	1279.78							
	6	1413.32	10.36	1280.67							
	7	1413.32	10.36	1280.67							
	8	1413.32	10.36	1280.67							
	9	1413.32	10.36	1280.67							
	10	1413.32	10.36	1280.67							
4	1	1413.32	10.36	1280.67	7000	1.829	8000	1.600	48000	76777.80	1.600
	2	1413.32	10.36	1280.67							
	3	1413.32	10.36	1280.67							
	4	1413.32	10.36	1280.67							
	5	1420.64	10.97	1280.22							
	6	1420.64	10.97	1280.22							
	7	1420.64	10.97	1280.22							
	8	1420.64	10.97	1280.22							
	9	1420.64	10.97	1280.22							
	10	1420.64	10.97	1280.22							
5	1	1420.64	10.97	1280.22	7000	1.829	8000	1.600	48000	76777.80	1.600
	2	1420.64	10.97	1280.22							
	3	1420.64	10.97	1280.22							
	4	1413.82	10.43	1280.24							
	5	1413.82	10.43	1280.24							
	6	1413.82	10.43	1280.24							
	7	1413.82	10.43	1280.24							
	8	1413.82	10.43	1280.24							
	9	1413.82	10.43	1280.24							
	10	1413.82	10.43	1280.24							



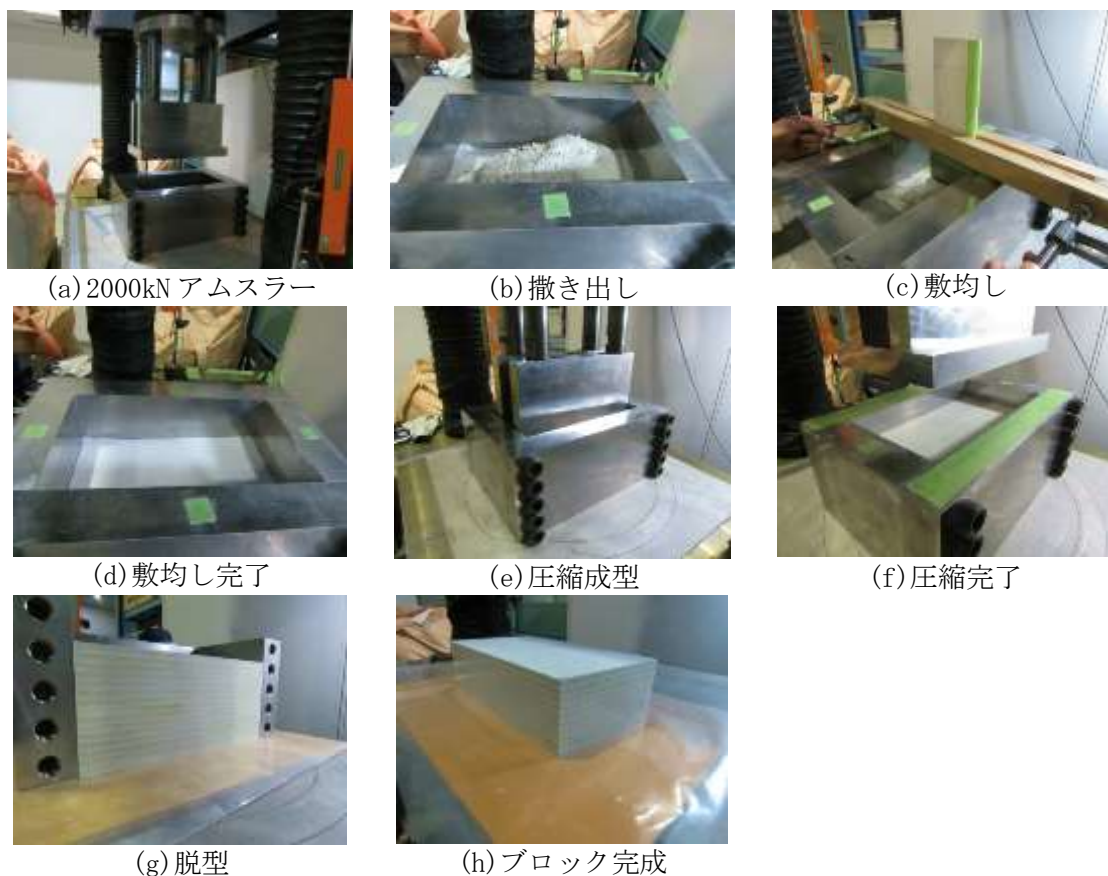


図 5.1.5-3 高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験用供試体作製フロー



図 5.1.5-4 高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験供試体

### (3) 試験結果

図 5.1.5-5 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ており、現状では、まだ隙間を満たすほどの湧水は発生していない。

今後、試験を継続して、実処分場の条件に近い、高水圧・低流量環境下で緩衝材流出現象が発生するかどうかを確認し、発生する場合、その影響を定量評価する予定である。さらに、緩衝材と天然バリアの間に隙間がある間の緩衝材の膨潤圧の経時変化も取得し、流出現象と膨出現象の関係についても取得する計画である。

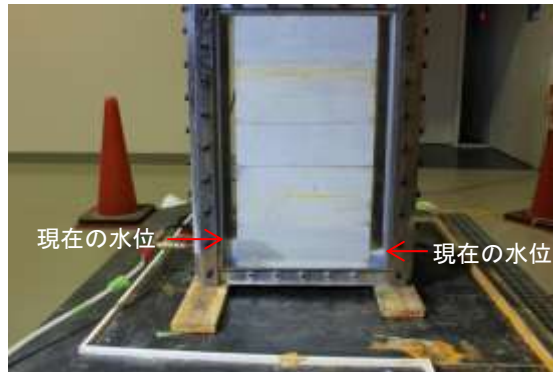


図 5.1.5-5 高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験状況

### 5.1.6 まとめ

本事業では、放射性廃棄物地層処分施設が再冠水する際に、地下水が緩衝材に浸潤して行く過程で発生する事象のうち、緩衝材表面近傍の止水性能評価に着目し、各種試験を実施した。以下、各試験により得られた結果をまとめた。

#### (1) 小型セルによる緩衝材流出試験

- ・ 透水係数が  $1 \times 10^{-10} \text{m/s}$  程度の花崗岩製のセルと、 $3 \times 10^{-8} \text{m/s}$  程度のイトトリア安定化ジルコニアを用いたセルを用いて流出試験を実施した。その結果、送水圧が高い状態が持続することはなかった。また、試験中に多孔質セルから緩衝材や通水液が滲み出てくるような現象も観察されなかった。総流量とエロージョン質量の関係もアクリルセルを用いた場合の結果と同等であった。
- ・ 今後、プレハイドレーションなどの効果について、多孔質セルとアクリルセルでは相違がある可能性があるため、今後の更なる検討が必要である。

#### (2) 水みちの断面積と流速・乾燥密度の関係取得試験

流出現象をモデル化して評価するために、流出時に形成される水みちの断面積を緩衝材の乾燥密度、流量をパラメータとして取得した。これまでの検討に基づいて、乾燥密度  $1.6 \text{Mg/m}^3$  と流量  $0.1 \text{L/min}$  を基本として、流量  $0.1 \text{L/min}$  で乾燥密度を  $1.2$ 、 $1.6$ 、 $2.0 \text{Mg/m}^3$  とした場合と乾燥密度  $1.6 \text{Mg/m}^3$  で流量を  $0.001$ 、 $0.01$ 、 $0.1$ 、 $0.4 \text{L/min}$  とした場合について試験を実施した。

- ・ 流量が  $0.1 \text{L/min}$  の場合、緩衝材は、乾燥密度に依らず、通水初期は若干膨潤して断面積が小さくなるが、その後はエロージョンによって断面積が大きくなった。また、乾燥密度が小さいほど断面積が大きくなる（流出が激しい）傾向があることがわかった。
- ・ 乾燥密度が  $1.6 \text{Mg/m}^3$  で一定の場合、流量が  $0.001$ 、 $0.01 \text{L/min}$  では膨潤によって水みちの断面積は小さくなり、 $0.1$ 、 $0.4 \text{L/min}$  では断面積は大きくなる結果となった。
- ・ 試験結果を外挿して乾燥密度  $1.6 \text{Mg/m}^3$  の緩衝材の流速毎の平衡値を求めると、ある

程度の流速以上では水みちでの流速の平衡値はほぼ一定になることがわかった。

- ・ 流量が 0.1L/min の場合、ある程度乾燥密度以上では、水みちでの流速の平衡値はほぼ一定になることが分かった。なお、本試験では、機械的に試験時間を最大で 1 日として決定したため、平衡値を実験から求めることができなかった。今後、同様の手法で、長時間の試験を実施すれば、乾燥密度毎の限界流速を取得することができると思われる。

### (3) 工学規模流出試験

エロージョン対策として、隙間にペレットを充填した場合の流出現象について蒸留水を用いて調べた。

- ・ ペレットのケースのエロージョン量と給水量の関係は、他のケースに比べ、同じ給水量に対してエロージョン量が多い。これは他の試験ケースに比べ、隙間の容積が小さいために、少量の給水量から流出が始まったためであると考えられる。逆に言えば、他のケースでは試験装置の隙間の容積が大きいため、隙間を水で満たす分に加えて隙間がある程度膨潤によって狭まり流速が増加するまでの間に給水された分だけ、流出開始までに必要な注水量が大きくなり、試験結果が右方向にシフトしたものと考えられる。
- ・ ペレットのケースは、他のケースに比べてエロージョン量と給水量の関係の勾配が緩く、緩衝材の流出に対する長期的な抑制対策としてペレット充填が効果的であることを意味している。
- ・ ペレットのケースの解体の結果、給水管所のある箇所は乾燥密度が小さくなっていることがわかった。また、乾燥密度が低下している箇所は、飽和度の増加が顕著であり、概ね飽和している状況であった。
- ・ 無対策のケースに比べてペレット充填のケースの飽和度分布は、全体的に飽和度が低い。ペレット部分が水を含んで先に膨潤し、ブロックへの水の供給は、この膨潤したペレットを介して行われるためであると考えられる。ペレットを充填することで膨潤を非常に緩やか、かつ均等にする効果が期待できることがわかった。

### (4) 高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験

- ・ 実処分環境を模擬した試験条件を考慮し、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するための試験を開始した。今後、試験結果によるが、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。

## 5.2 地下研究施設における緩衝材流出試験

### 5.2.1 目的と概要

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（パイピング）、浸食（エロージョン）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。ここでは水みち形成（パイピング）と浸食（エロージョン）を「流出」と呼ぶ。本業務は、岩盤中で緩衝材の流出が発生する状況を確認することにより、緩衝材を設計する際に考慮すべき重要な要素となる緩衝材の流出に関する知見を得ることを目的としている。

具体的には、幌延深地層研究センターの地下施設の試験孔に模擬緩衝材（以降、緩衝材と呼ぶ）を定置し、地下という実際の処分環境に近い状態において、岩盤中の緩衝材の挙動を調べる。

試験の実施に際し、平成 27 年度までに、次に記す地下の試験環境を整備した。

- ▶ 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
- ▶ 緩衝材に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
- ▶ 試験孔内湧水を制御するためのボーリング孔の掘削

今年度の業務では、まずは、長期試験の試験体を回収し、分析を行った。

また、新たに 3 ケースの原位置試験を以下の目的に基づいて実施した。

- ▶ 緩衝材の水みち形成と膨潤圧との関係を確認する
- ▶ 緩衝材の流出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、その効果について確認する

## 5.2.2 試験設備

幌延深地層研究センターの地下施設である試験坑道5に試験孔を設置した。試験坑道5における試験孔の位置を図5.2.2-1に示す。また、試験孔3および試験孔2（予備孔）と注水用ボーリング孔についての詳細を図5.2.2-2に示す。さらに、今年度、新たに実施した3種類の試験で使用した計測システムの模式図を図5.2.2-3に示す。



図 5.2.2-1 試験坑道5における試験孔

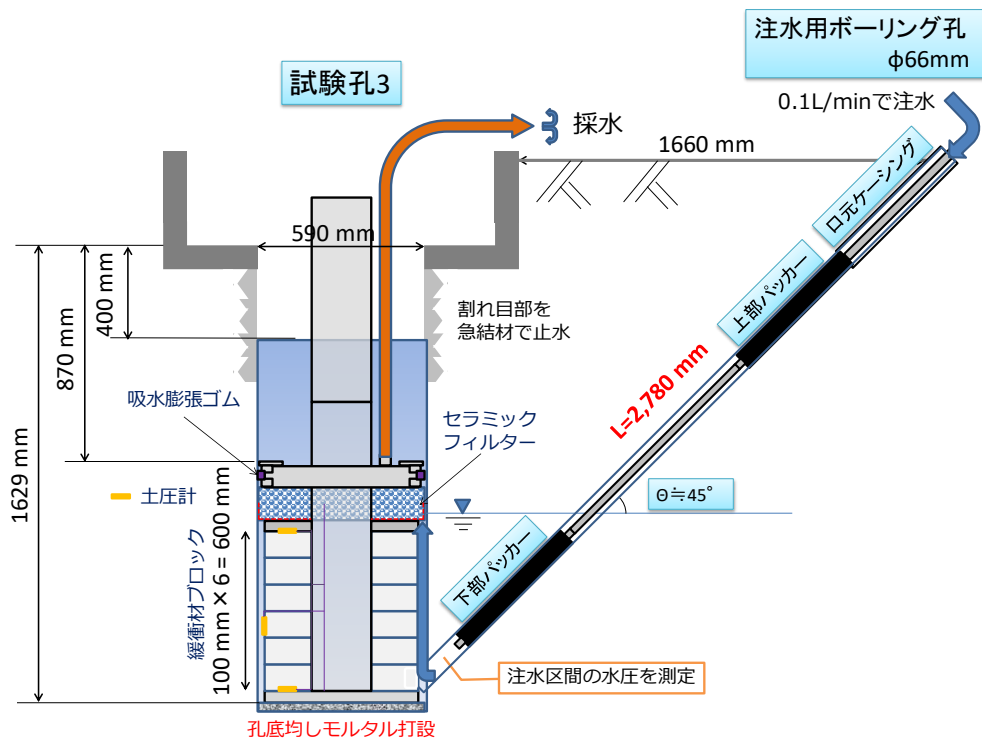


図 5.2.2-2 試験孔3と注水用ボーリング孔

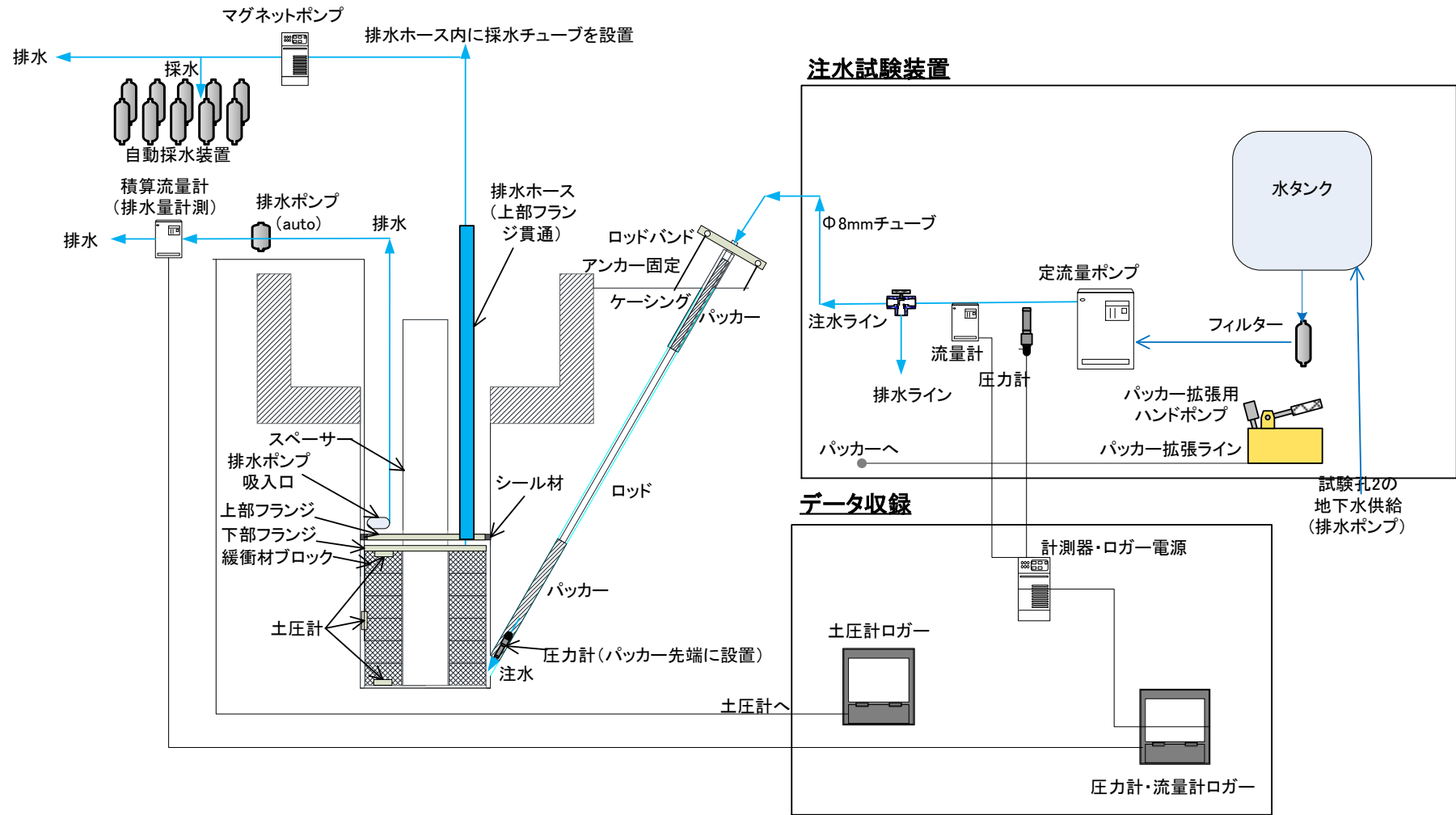


図 5.2.2-3 計測システム模式図

### 5.2.3 試験準備・予備試験

#### (1) 緩衝材ブロックの製作

##### 1) 混合土

試験体を構成する緩衝材ブロックの製作に必要な、ベントナイト混合土を製作した。材料は以下に示すベントナイト（クニゲル V1）と珪砂とした。

材料：クニゲル V1（70wt%）、3号（15wt%）および5号（15wt%）珪砂、水道水

配合：クニゲル V1：3号珪砂：5号珪砂=70wt%：15wt%：15wt%

含水比調整の加水量は 10.5%で調整した。

以下に混合材料について示す。

##### a 使用材料

緩衝材に用いた混合材料（クニゲル V1 と珪砂の混合土）を構成する使用材料、および混合材料の配合比を表 5.2.3-1 に示す。

表 5.2.3-1 混合材料の使用材料と配合

使用材料	名称	配合重量比	備考
ベントナイト	クニゲル V1	70 wt%	クニミネ工業（株）
珪砂	珪砂 3号	15 wt%	日陶連原料（株）
	珪砂 5号	15 wt%	日陶連原料（株）
混合水	水道水	—	含水比は 10.5%となるよう設定

##### b 含水比

平成 27 年度までの実績等より、珪砂混合率 30wt%、乾燥密度 1.92 Mg/m<sup>3</sup>の緩衝材ブロックを製作する際の含水比を 10.5%と設定した。得られている知見等を以下に記す。

成型圧力が 20MPa および 50MPa の時の、珪砂混合率の異なる材料に対する既往の締固め試験の結果[7]を図 5.2.3-1 に示す。この結果より、珪砂混合率 30wt%では静的圧力 20MPa と静的圧力 50MPa のいずれの場合も、含水比 10%程度で締固め性が向上していることがわかる。そのため、含水比の製作目標値を 10%とし、バラつきを考慮した製作時の設定値を 10.5%とした。



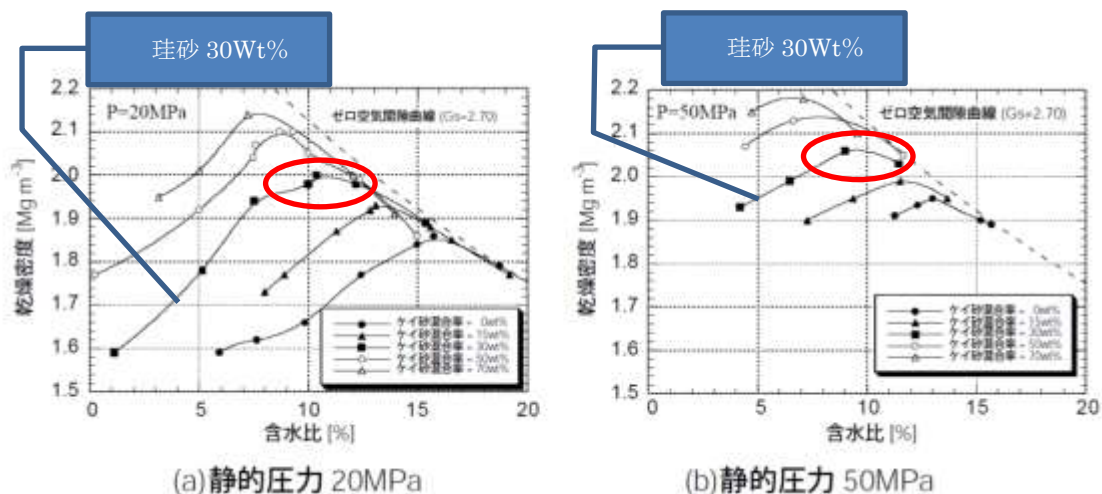


図 5.2.3-1 静的締固め試験結果

2) 緩衝材ブロック

a ブロック仕様

緩衝材ブロックは、試験体を水平方向は 8 分割、鉛直方向は 6 分割の計 48 分割した同一形状のブロックとし、金型を用いた一軸静的プレスによる上記混合材料の加圧成型により製作した。製作仕様を表 5.2.3-2 に示す。緩衝材ブロックの数量は、6 段積みした試験体（各 48 個使用）に必要となる計 144 個であった。

表 5.2.3-2 試験ケースごとの緩衝材ブロックの仕様

項目 ケース	製作目標値		個数
	乾燥密度	含水比	
ケース 1	1.92 Mg/m <sup>3</sup>	10.5%	48 個
ケース 2	1.92 Mg/m <sup>3</sup>	10.5%	48 個
ケース 3	1.92 Mg/m <sup>3</sup>	10.5%	48 個
合計			144 個

b ブロック形状

緩衝材ブロックを図 5.2.3-2 に示す。

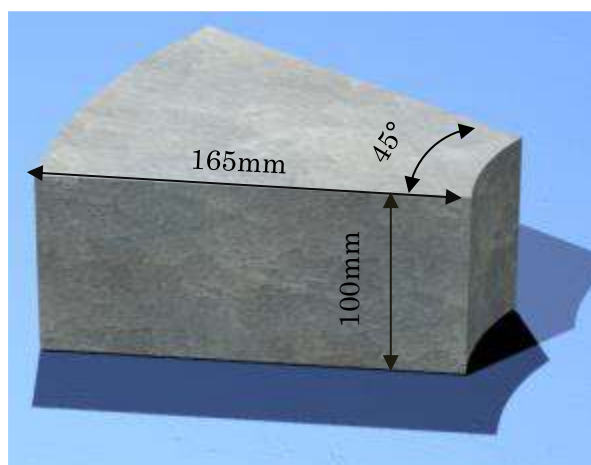


図 5.2.3-2 緩衝材ブロック

(2) 緩衝材定置治具および蓋の製作

緩衝材ブロック用定置治具等（蓋、スペーサー、底板、等）の図面を図 5.2.3-3 に示す。

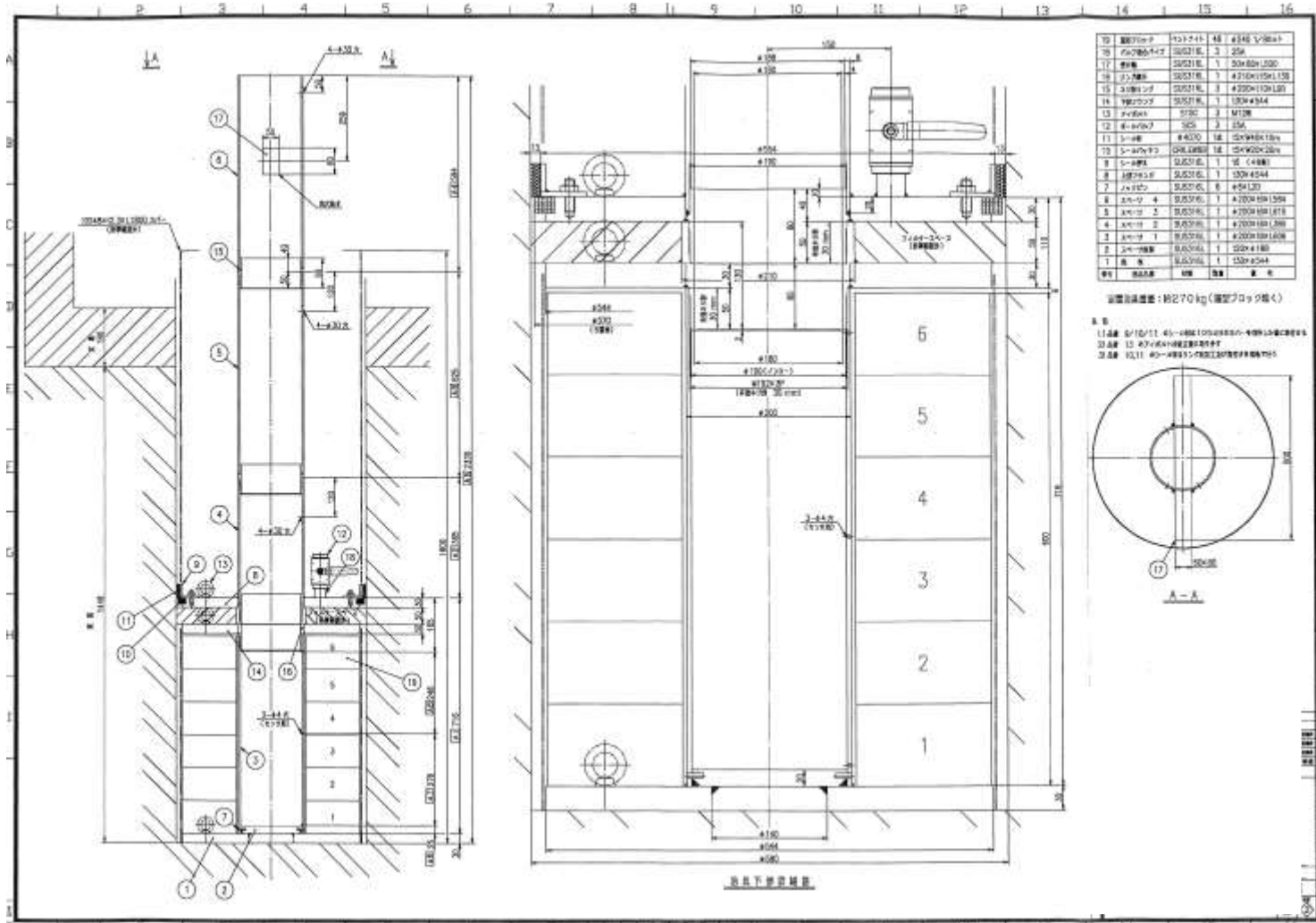


図 5.2.3-3 緩衝材定置治具等の設計図面

### (3) 湧水量測定

#### 1) 湧水量測定の概要

試験孔 2 および 3 の湧水量測定を実施した。測定方法は、投げ込み式の水圧計（図 5.2.3-4 参照）による静水圧の連続測定とした。測定対象とした孔を排水した状態で、水圧計を孔底に投入し、湧水による水位回復過程で上昇する静水圧をもとに、水位上昇速度を求め、これに試験孔の断面積を乗じて得られる値を湧水量とした。



図 5.2.3-4 水圧計（S&DL mini およびバロメータ）

#### 2) 測定ケースの設定

湧水量測定のケース設定は試験孔 3 を対象としたケース 1、2 と、試験孔 2 を対象としたケース 3 の合計 3 ケースを実施した。ケースの設定を表 5.2.3-3 に示す。

試験孔 3 を対象とした測定の際、測定しない試験孔 2 の状態をケース 1 では満水状態、ケース 2 では試験時の水位（孔底から約 80cm）に制御した状態とした。

試験孔 2 を対象とした測定では、測定しない試験孔 3 は試験時の水位に制御した状態のケース 3 のみとした。注水孔内のパッカーはいずれのケースも拡張した状態とした。

表 5.2.3-3 湧水量測定のケース設定一覧

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	満水	計測
ケース 2	腐食試験	水位制御	計測
ケース 3	腐食試験	計測	水位制御

### 3) 湧水量測定結果

ケース 1、2（試験孔 3）およびケース 3（試験孔 2）の水位の経時変化を図 5.2.3-5 および図 5.2.3-6 に、また、移動平均を適用して得た湧水量と孔内水位の関係を図 5.2.3-7 および図 5.2.3-8 にそれぞれ示す。参考までに、いずれのグラフも昨年度の測定結果を併せてプロットした。なお、図中の「平均湧水量」は、試験孔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、試験孔の高さを除して得られる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、表 5.2.3-4 に各ケースの平均湧水量を示す。

図 5.2.3-5 に示す試験孔 3 の水位の経時変化では、ケース 1 および 2 は平成 27 年度よりも水位の回復が早く、図 5.2.3-6 に示す試験孔 2 の水位の経時変化では、ケース 3 の方が平成 27 年度よりも水位の回復が遅かった。一方、図 5.2.3-7 および図 5.2.3-8 に示した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大きく、水位が上昇するにつれ湧水量が小さくなる過年度と同じ傾向が確認された。

なお、水位の経時変化は概ね直線傾向であることから、平均湧水量を各孔の湧水量の代表値とした。これより、平均湧水量は、試験孔 2 と試験孔 3 は概ね同じであることがわかった。また、隣接する試験孔の相互の影響は小さく、各孔が独立していると判断した。

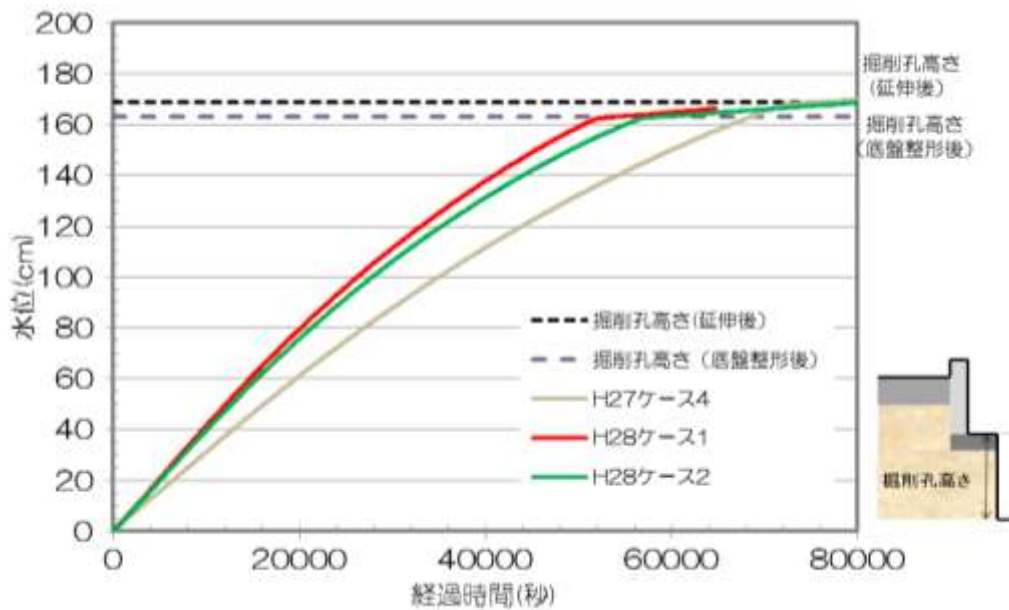


図 5.2.3-5 試験孔 3 の水位の経時変化（ケース 1、2）

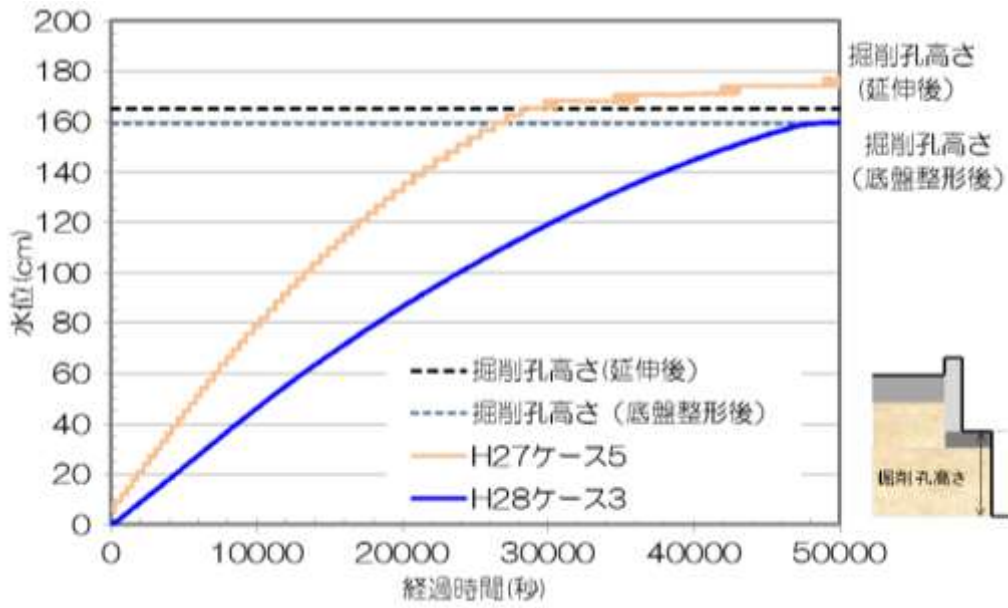


図 5.2.3-6 試験孔 2 の水位の経時変化 (ケース 3)

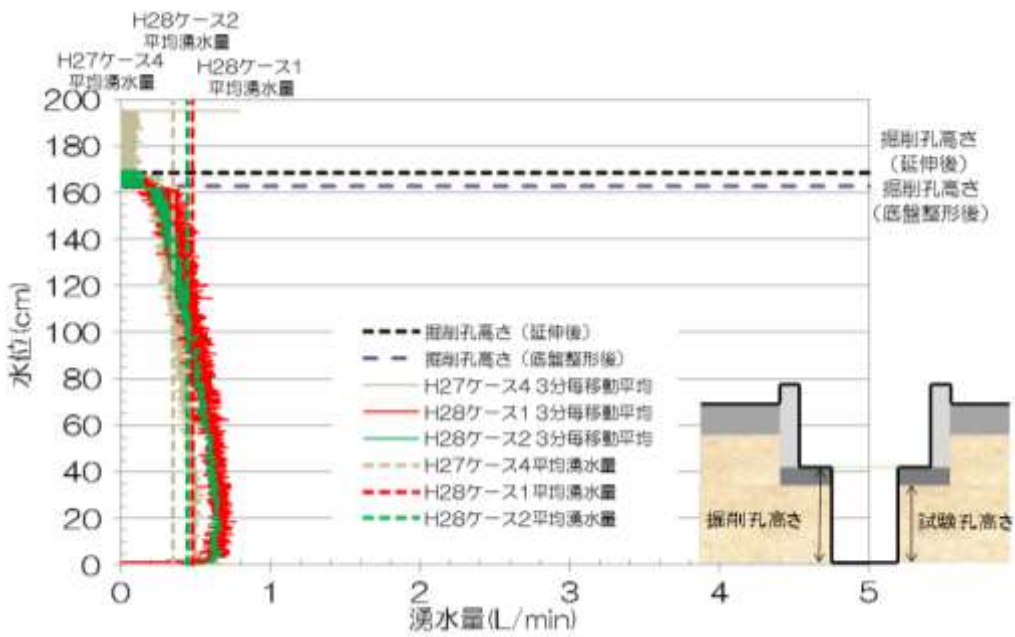


図 5.2.3-7 試験孔 3 の湧水量と水位の相関 (移動平均)

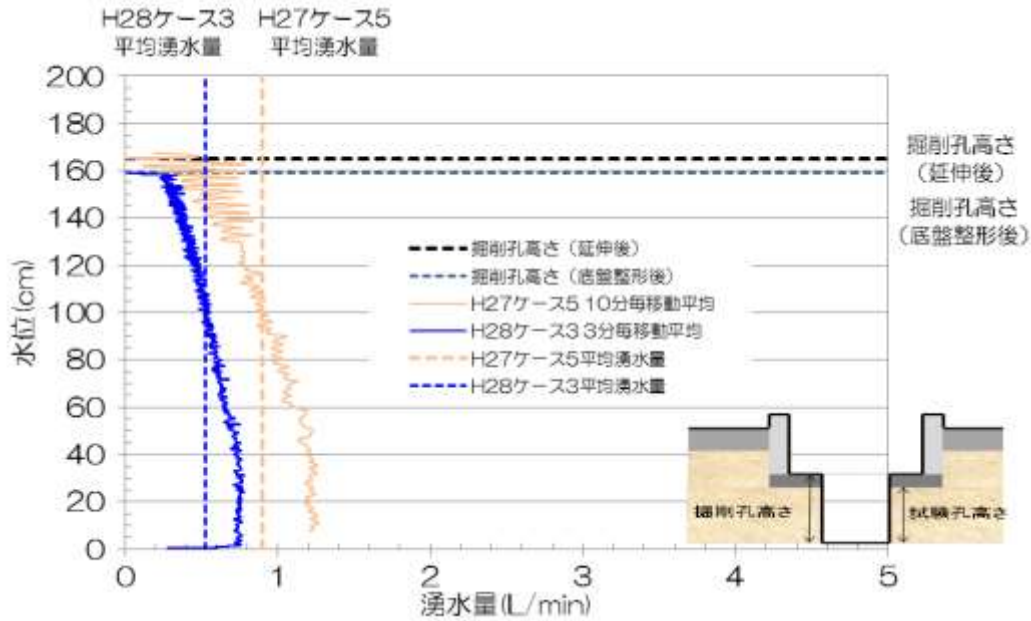


図 5.2.3-8 試験孔 2 の湧水量と水位の相関 (移動平均)

表 5.2.3-4 ケースごとの平均湧水量

No.	測定箇所	湧水量	試験孔 1*	試験孔 2	試験孔 3
1	試験孔 3	0.5 L/min	満水	満水	計測
2	試験孔 3	0.4 L/min	満水	水位制御	計測
3	試験孔 2	0.5 L/min	満水	計測	水位制御

(※オーバーパック腐食試験を実施中)

#### (4) 採水試料の吸光度分析

採水について、吸光度分析によりベントナイトの定量評価を行った。本業務ではベントナイトの濃度を緩衝材濃度とした。

##### 1) 分析方法概要

吸光度分析は特定の波長の光 (単色光) を溶液試料に当てた際、通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れば、溶液の濃度の算出が可能となる分析法である。

##### 2) 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」および「株式会社 エスエムテック製 超音波分散機 UH-50」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 5.2.3-9 分光光度計 UVmini-1240

表 5.2.3-5 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	波長と連動した光源自動切替 (295～364nm) 切替なしのハロゲンランプ (W1) のみ使用 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 5.2.3-6 超音波分散器仕様

製造者	(株)エスエムテー
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：32φ×297H (mm)
重量	発振器：約 4 kg
	振動子：約 160 g

3) キャリブレーション

緩衝材の濃度測定のため、まずはベントナイト濃度が既知の検量溶液を作成し、吸光度との相関による検量線の作成を行った。この検量線を用いて吸光度を換算し、排水中に含まれるベントナイト濃度を求めた。なお、季節変動等の外乱による現地地下水の水質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と検量線の取得の作業は現地の地下水を採水して行った。試料の調製方法については、地盤工学会基準 (JGS0251-2000) の方法に準拠した。図 5.2.3-10 に今回使用した検量線を示す。

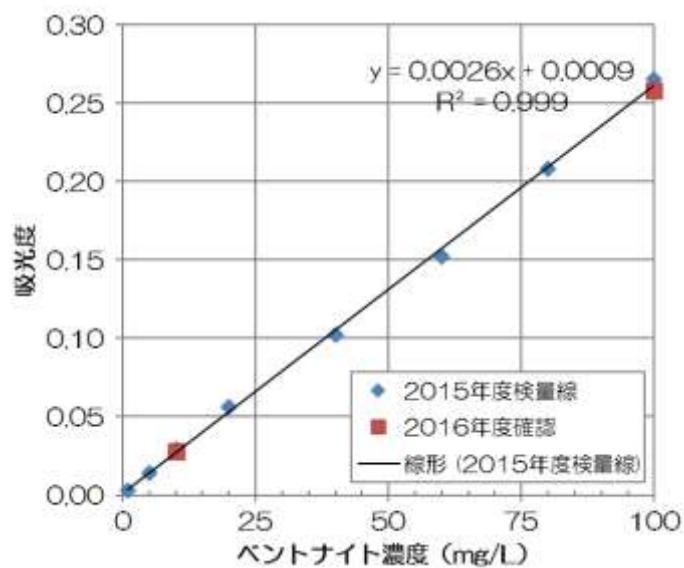


図 5.2.3-10 本業務で使用した検量線

## 5.2.4 長期の流出試験

### (1) 緩衝材の流出確認

試験孔に色水（食紅、等にて着色）を注入し、水みちの確認を行った。色水の注入開始から約 8 分後に、注水孔がある東側から色水が確認された。その後、図 5.2.4-1 に示す時間と場所で色水が確認された。今回の試験では、時間によって異なる場所（4 箇所）から色水が出現した。緩衝材の上部全面がほとんどがゲル状になっていたことから、どこの場所からも流出が容易な状態であったことが推察される。そのため、複数箇所から流出が生じたと考えられる。

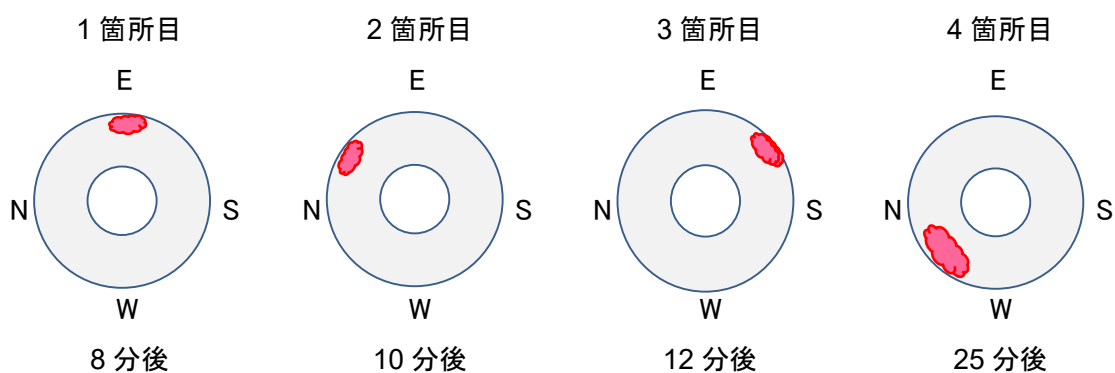


図 5.2.4-1 色水の出現箇所と要した時間



図 5.2.4-2 色水の出現状況

### (2) 緩衝材の流出量

採水中の緩衝材の濃度の経時変化を図 5.2.4-3 に示す。参考として、注水圧力と注水流量のデータも併せてプロットした。図 5.2.4-3 より、注水圧力は上昇した後、急激な低下が見られることから、緩衝材の流出が生じていることがわかる。

また、採水中の緩衝材の濃度に着目すると、緩衝材の濃度は、注水圧力が急低下した際（200 時間経過後）に一時的に上昇するが、それ以降はしばらく低い状態であった。しかし、1700 時

間経過後の水みち確認後には上昇した。水みち確認前後の試験状況を確認した際、水みち確認前までは、試験体と孔壁との隙間で見られていた試験孔壁面からのガスの間欠的な湧出が、図 5.2.4-4 に示すように、水みち確認後では試験体の上面から見られるようになった。したがって、水みち確認後の緩衝材濃度の増加は、ゲル化した緩衝材表面がガスにより吹き上げられたために起因していると考えられる。

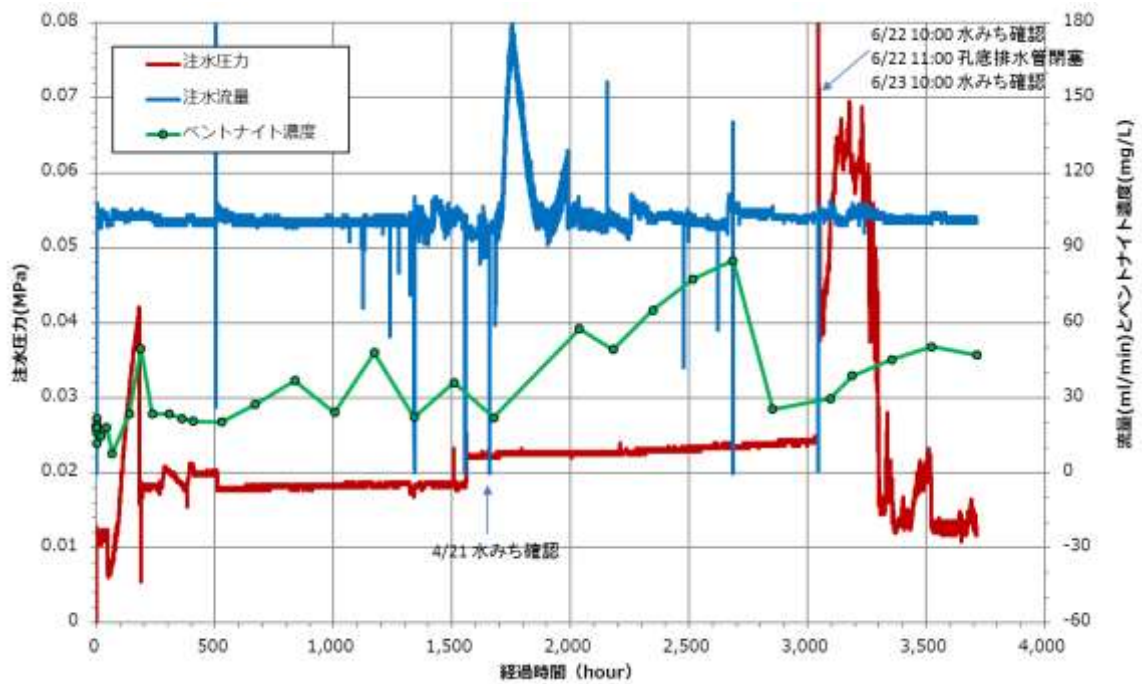


図 5.2.4-3 注水圧、注水流量、緩衝材濃度の経時グラフ



図 5.2.4-4 試験体上面からのガスの湧出

### (3) 試験終了後の緩衝材の状態

試験体の最上部（ゲル化した部分）の試料を、アクリル製サンプラーにより 3 本回収した。図 5.2.4-5 にサンプリングの状況を示す。

回収した試験体の状態を目視で確認した結果、注水孔のある東側に幅が約 6cm、深さ約 3.5cm 程度の大きさで、えぐれている様子が確認できた（図 5.2.4-6、図 5.2.4-7）。また、この部分から上方に溝のような痕跡が見られた。これは水みちと考えられる。図 5.2.4-8 図 5.2.4-9 に示した試験体回収後の試験孔 3 の孔壁にも、水みちが認められる。

試験体回収後は、差し込んでいた短いアクリルパイプからゲル部（図 5.2.4-10）を回収後、緩衝材ブロックを解体した。回収した試験体の緩衝材ブロックから、深さ方向に上段、中段、下段（上から 1 段目、4 段目、5 段目）の位置ごとに、円周方向に内、中、外の位置、計 9 箇所から分析（乾燥密度測定）用のコアを採取した（図 5.2.4-11、図 5.2.4-12）。また、参考のため上記の水みち付近からも緩衝材の膨潤状況を把握するためにコアを取得した。

なお、試験体回収終了後、試験孔の壁面を観察した結果、孔壁に緩衝材が張り付いた状態であった。これは、ハイウォッシャーで洗浄しなければ削除できない状態であった（図 5.2.4-13）。



図 5.2.4-5 アクリルサンプラーによるサンプリング状況



図 5.2.4-6 引き上げた試験体の概観（東側）





図 5.2.4-7 水みちと見られる箇所寸法の測定

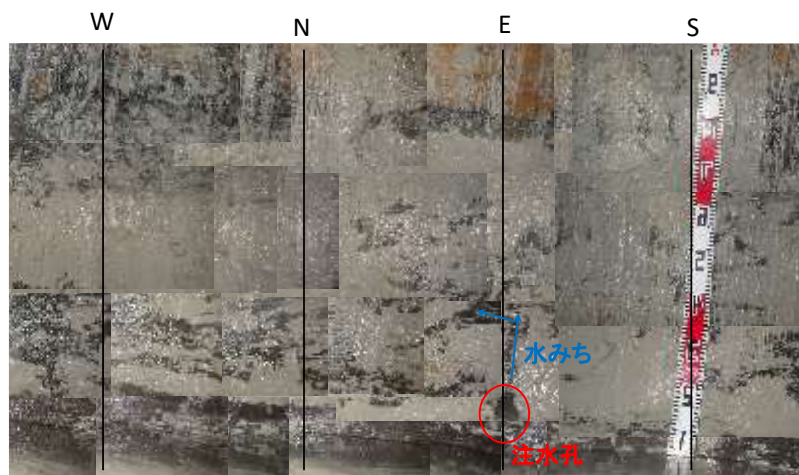


図 5.2.4-8 試験体回収後の試験孔 3 の孔壁

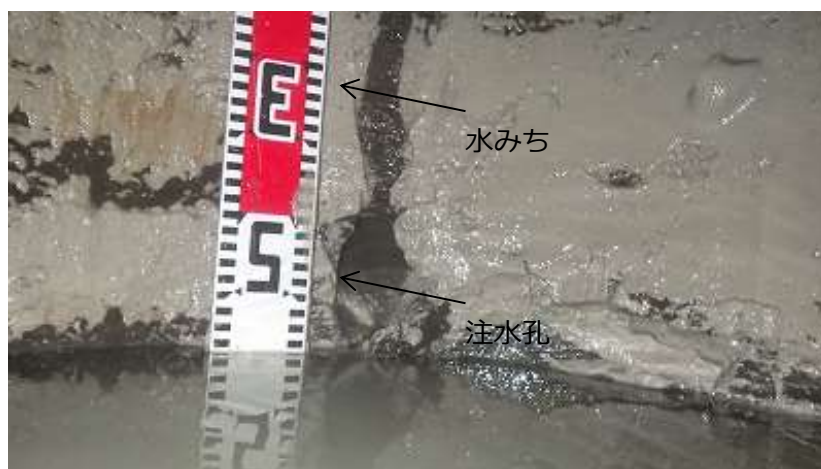


図 5.2.4-9 注水孔と水みち



図 5.2.4-10 ゲル部サンプルの寸法確認



図 5.2.4-11 コア取得状況



図 5.2.4-12 採取したコア





図 5.2.4-13 試験孔内の洗浄状況

#### (4) 緩衝材の密度測定・含水比測定

採取した試料は、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）等に基づいた土質試験を実施し、密度や含水比等のデータを取得した（図 5.2.4-14～図 5.2.4-16）。試験結果を表 5.2.4-1 と表 5.2.4-2 にそれぞれ示す。

##### 1) コアを対象とした土質試験の主な結果

- 試験体の乾燥密度は、試験体上段は約  $1\text{Mg/m}^3$  と非常に低かったが、中段および下段は  $1.6\sim 1.7\text{ g/m}^3$  となっており、緩衝材ブロックの設計上の想定である膨潤後の乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  に近い密度であった。
- 緩衝材の飽和状態を示す含水比は、上段は  $53\%\sim 67\%$  でありと中段・下段 ( $20\%\sim 29\%$ ) の倍近い値を示した。一方、同一段内では、試験孔の孔壁と接する外側が高く、上から 4 段目以外は中央部が内側よりも、わずかに大きい結果となったが概ね同程度であった。

##### 2) ゲル部を対象とした土質試験の主な結果

- 上段から採取した No.1～3 までのサンプルについては、サンプリング時点で形状を維持できない、寸法測定時に内部に空洞が生じるなど、寸法に関する誤差が大きいと考えられるため、含水比と土粒子密度以外の数値は参考値にとどめる。
- 引き上げ後に採取したゲル部のサンプルについては、飽和度が  $95\%$  であった。この乾燥密度は  $0.417\text{Mg/m}^3$  となっており、初期値の  $1.92\text{Mg/m}^3$  の約  $1/5$  であった。



図 5.2.4-14 土質試験実施状況（土粒子の密度試験）



図 5.2.4-15 土質試験実施状況（土の含水比試験）



図 5.2.4-16 土質試験実施状況（土の湿潤密度試験）

表 5.2.4-1 採取した試料の土質試験結果

	上段 (1 段目)			中段 (4 段目)			水みち 付近	下段 (5 段目)			下段 (6 段目)	
	内	中	外	内	中	外		内	中	外	内	中
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6		No.7	No.8	No.9	No.10	No.11
湿潤密度 $\rho_t$ $Mg/m^3$	1.793	1.748	1.605	1.976	1.972	2.081	2.046	2.058	2.041	2.010	2.052	2.126
乾燥密度 $\rho_d$ $Mg/m^3$	1.174	1.112	0.966	1.578	1.581	1.609	1.641	1.688	1.657	1.578	1.710	1.764
土粒子密度 $\rho_s$ $Mg/m^3$	2.695	2.750	2.695	2.570	2.575	2.597	2.588	2.585	2.584	2.561	2.696	2.701
含水比 $w$ %	52.7	57.2	66.2	25.2	24.7	29.3	24.7	21.9	23.2	27.4	20.0	20.5
間隙比 $e$	1.296	1.473	1.790	0.629	0.629	0.614	0.577	0.531	0.559	0.623	0.577	0.531
飽和度 $S_w$ %	109.6	106.8	99.7	103.0	101.1	123.9	110.8	106.6	107.2	112.6	93.4	104.3
平均直径 $D$ cm	2.956	2.956	2.956	2.956	2.956	2.956	2.956	2.956	2.956	2.956	2.956	2.956
平均高さ $H$ cm	9.081	8.979	10.216	5.441	5.425	4.404	3.160	5.882	4.708	4.600	6.287	5.245
コア体積 $V$ $cm^3$	62.32	61.62	70.11	37.34	37.23	30.22	21.69	40.37	32.31	31.57	43.15	36.00

表 5.2.4-2 採取したゲル部の土質試験結果

	上方から採取分※				引上げ 後採取
	No.1	No.2 硬	No.2 軟	No.3	短
湿潤密度 $\rho_t$ Mg/m <sup>3</sup>	0.587	1.665	1.845	1.461	1.230
乾燥密度 $\rho_d$ Mg/m <sup>3</sup>	0.168	0.814	0.672	0.300	0.417
土粒子密度 $\rho_s$ Mg/m <sup>3</sup>	2.668	2.720	2.728	2.666	2.854
含水比 $w$ %	248.7	104.6	174.7	386.2	195.0
間隙比 $e$	14.881	2.342	3.060	7.887	5.844
飽和度 $S_w$ %	44.6	121.5	155.7	130.5	95.2
平均直径 $D$ cm	6.600	6.600	6.600	6.600	6.600
平均高さ $H$ cm	17.900	6.500	9.000	9.500	19.700
コア体積 $V$ cm <sup>3</sup>	612.39	222.38	307.91	325.01	673.98

※サンプリング時の状況から誤差が大きいと考えられる寸法に関連する値は参考値とした。

## 5.2.5 Case1 の流出試験

### (1) 試験準備

#### 1) 注水設備および計測設備の設置

注水区間の圧力測定については、特に安定した（値の変動が小さい）測定を行う必要がある。そのため、水圧計を注水区間の先端に保護管を設置し、その内部に収まるようにして設置した（図 5.2.5-1 参照）。なお、パッカー設置は注水区間に BTV 結果より割れ目は出現しないことを確認してから実施した。図 5.2.5-2 に BTV とパッカー設置位置を示す。また、使用した計測項目と計測器を表 5.2.5-1 に示す。



図 5.2.5-1 注水区間水圧計組立状況（左）／ 組立完了（右）

表 5.2.5-1 計測項目と計測器

計測項目	計測器	数量	備考
膨潤圧	土圧計 東京測器：KDE-2MPA	3	容量 2MPa、定格出力約 0.5mV/V (1000×10 <sup>-6</sup> ひずみ) 設置場所：上・中・下段
水圧	水圧計 GE センシング & インスペクション・テクノロジー ズ：PMP5033	2	圧力変換器レンジ 0～2MPa、精度± 0.04%FS (BSL) 設置場所：ポンプ近傍、注水区間
注水流量	流量計 KEYENCE：FD-SS2A	1	コリオリ式、定格範囲 0～ 2000cc/min
排水流量	積算流量計 KEYENCE：FD-Q20C	1	クランプオン式デジタル流量センサ ー、定格流量 100 L/min、表示分解 能 0.1L/min



図 5.2.5-2 パッカー設置位置

## 2) 土圧計の設置

### a 試験体および上部／下部土圧計の組立・設置

使用した緩衝材ブロックの乾燥密度（膨潤前）は  $1.92\text{Mg/m}^3$  であり、48 個（8 個／段×6 段）を積み上げて試験体を組み立てた。上部および下部の土圧計は、緩衝材と定置治具の下部フランジの間および緩衝材と底板との間にそれぞれ緩衝材を掘り込んで設置した。その際、ケーブルを試験体治具の中に通すために、ケーブル部分も緩衝材ブロックを掘り込んだ（図 5.2.5-3）。

試験体の設置では、孔壁との接触を防止する鉄製の保護カバーを先に設置し（図 5.2.5-4）、その中を通すように試験体を定置治具に乗せた状態で孔内に設置した（図 5.2.5-5）。



図 5.2.5-3 緩衝材ブロック加工状況（左）／加工完了（右）



図 5.2.5-4 保護カバー設置状況





図 5.2.5-5 試験体設置状況

b 中部土圧計の設置

中部土圧計は図 5.2.5-6 の概念図に示すように、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んだ後、土圧計の位置が試験体の概ね中央になるよう高さを調整し、試験孔 3 の南側の孔壁沿いに吊るして設置した (図 5.2.5-7)。

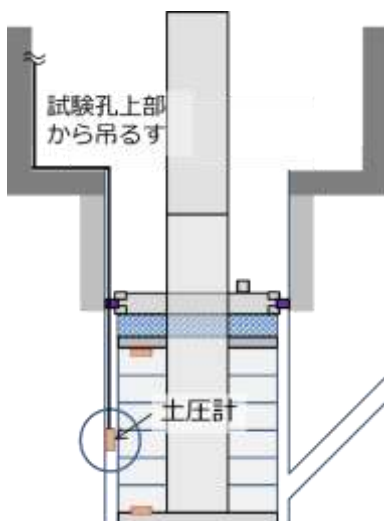


図 5.2.5-6 中部土圧計設置概念図



図 5.2.5-7 保護管に通した中部土圧計 (左) / ケース 1 の設置位置 (右)

### 3) 採水設備の設置

本試験では、試験体上部に蓋（上下フランジ）を設置し、緩衝材の体積膨張を抑制した。なお、蓋には採水口をとりつけた。採水は採水口から、マグネットポンプ（図 5.2.5-8）にて 10～20ml/min 程度で連続的に行った。



図 5.2.5-8 自動採水装置 マグネットポンプ

## (2) 注水試験

### 1) 試験条件

試験は、注水ボーリング孔の下部をパッカーで閉塞し、HPLC ポンプの流量制御による 100 ml/min の定流量注水とした。注水中は、流量計による注水・排水量の計測データ、圧力計による注水区間の水圧データ、土圧計による土圧データの計測を行った。また、緩衝材の流出量を測定するために採水も随時実施した。



図 5.2.5-9 ケース 1 注水開始時の状況

## 2) 試験結果

### a 膨潤圧

図 5.2.5-10 に土圧の経時変化を注水区間の圧力と併せて示す。土圧は、いずれも注水開始から 70 時間程度までは緩やかに低下した。その後、側部土圧計が上昇に転じ、約 400 時間後までに 0.8MPa に増加した。試験中、試験孔内を排水した際に数値が一時的に低下したが、概ね 0.8MPa を維持していた。これより、本試験環境下での緩衝材ブロックの膨潤圧は 0.8MPa 程度であると考えられる。なお、上部/下部土圧については、約 300 時間経過後から緩やかに上昇傾向を示した。

土圧計設置位置の違いにより土圧が増加しはじめる時間が異なるのは、緩衝材の上下部は、蓋や底板により緩衝材が水と常に接触することが妨げられるため、膨潤がゆっくり進んだのに対し、中部土圧計が設置されている緩衝材外周部は、試験孔の壁面と接触しており、常に水と触れているため膨潤が早く発現したためと考えられる。

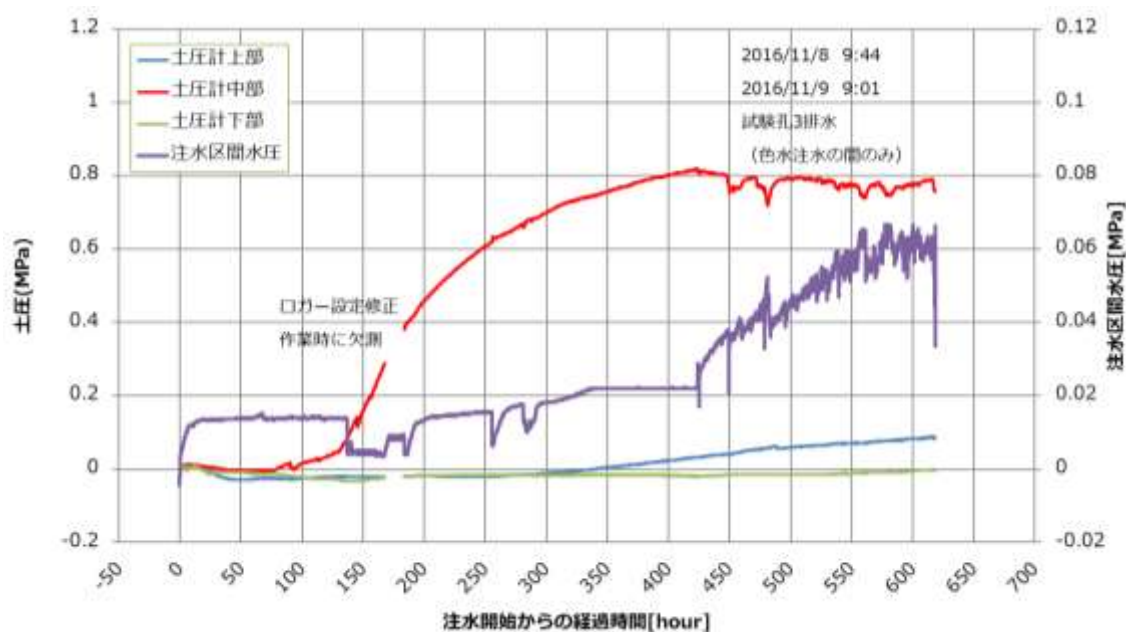


図 5.2.5-10 土圧の経時変化 (Case 1)

b 水圧／注水量流量

図 5.2.5-11 に注水区間水圧と注入流量の経時変化を示す。試験開始から 425 時間までは、試験方法（例えば、蓋の止水方法、など）が確立されていないため注水流量が一定にならなかった。そのため、その期間における注水区間水圧データは参考値とした。

425 時間後からは試験状況が安定した（注水流量の上下変動が小さくなった）ことにより試験が順調に進んだことがうかがえる。その結果、上下の振れ幅は大きい注水区間の水圧は全体的に上昇傾向を示し、550 時間以降は約 0.06MPa で落ち着いたことが確認できた。また、緩衝材の流出の指標としての注水区間水圧は、今回の試験では急激な低下は見られなかった。

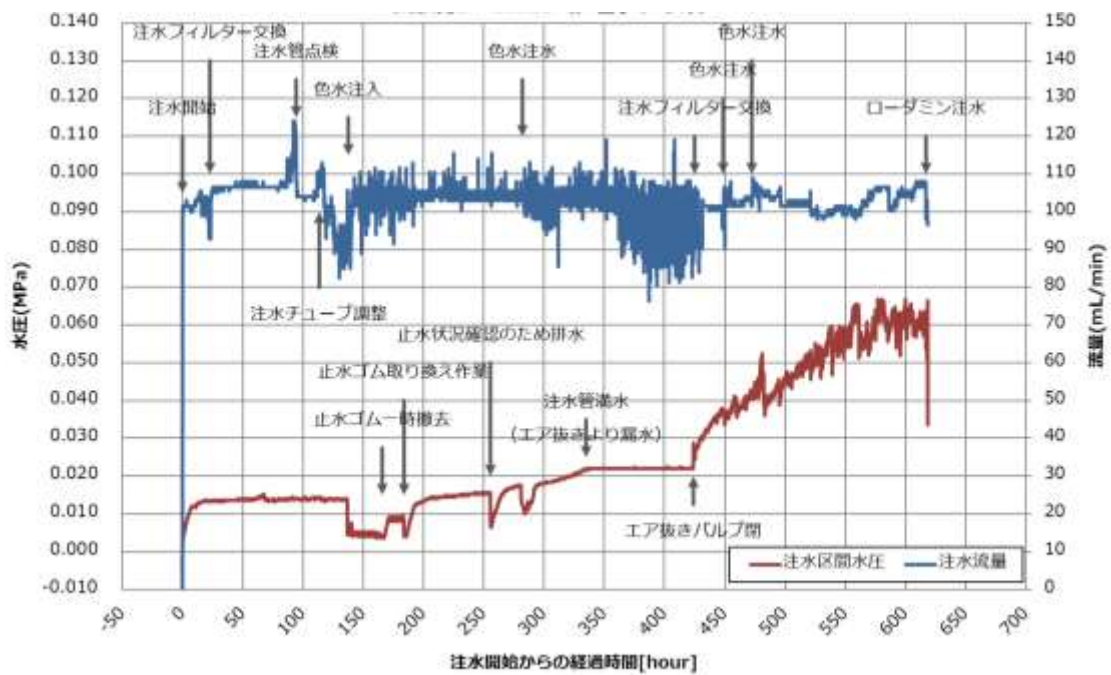


図 5.2.5-11 水圧・流量の経時変化 (Case 1)



### c 緩衝材の流出量

図 5.2.5-12 に緩衝材の流出量の変化を示す。参考のため、注水区間水圧も併せて表示した。なお、図 5.2.5-12 の緩衝材濃度は、試験開始前の緩衝材の濃度（バックグラウンド値、約 140 mg/L）からの増減値で表示した。試験期間を通じて、緩衝材濃度の変化は小さく、概ね同じ濃度であることから、緩衝材の流出は起きていなかったと考えられる。図中の異常値は、緩衝材の流出を確認するために注入した食紅によるものと、採水口から採取された水の量が少ない（溶媒が少量）ことによるものが考えられる。

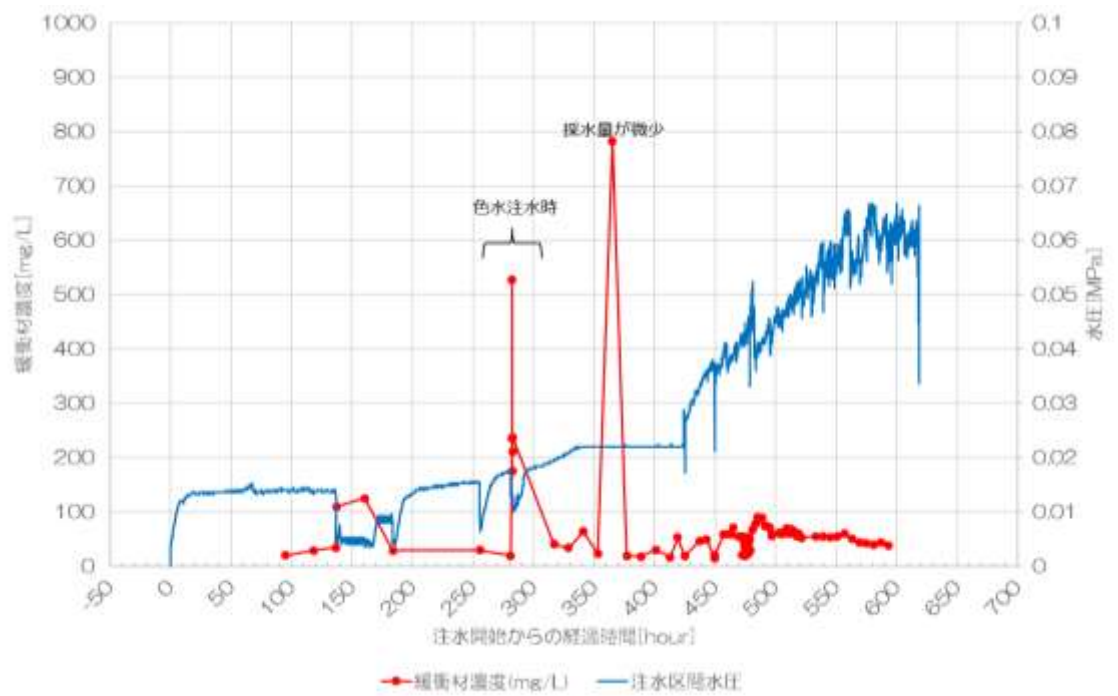


図 5.2.5-12 吸光度分析結果の経時変化 (Case 1)

### (3) 試験後の緩衝材の状態

最上段の緩衝材ブロックにおける水の浸潤は、外周から約 5cm、内側のスペーサー付近の一部、緩衝材ブロック同士の隙間で見られた。しかし、その他の部分は乾いた状態であった。また、試験体の上下段に大きな差は見られなかった (図 5.2.5-13、図 5.2.5-14)。

中段より下の段ではブロックの初期形状を保っており、解体はブロック単位で容易にできた。なお、下部土圧計と接している部分の緩衝材は湿ってはいたが、そこ以外はほぼ乾いていた (図 5.2.5-15)。土圧計を緩衝材に埋め込むために行った切り欠き部から水が浸潤し、そこから周囲に水が浸透していく過程段階であると推測される。



図 5.2.5-13 最上段の緩衝材ブロックの浸潤状況



図 5.2.5-14 試験体下段の浸潤状況



図 5.2.5-15 下部土圧計周辺の浸潤状況



#### (4) 緩衝材の密度測定・含水比測定

採取した試料は、長期試験の試料と同様の方法で、土の含水比試験（JISA 1203）、土粒子の密度試験（JIS A 1202）、土の湿潤密度試験（JIS A 1225）等に基づいた土質試験を実施した。試料は試験体の「最上段」、「中段」、「最下段」の3段を対象に「外側」、「中央」、「内側」の3か所から採取した。試料の試験結果を表 5.2.5-2 に示す。

試料の乾燥密度は、その取得や採寸に難があったと考えられる一部を除き 1.3～1.7 の範囲となり、試験体と孔壁との隙間が均等に 2cm であると仮定したときの膨潤後の想定乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  に近い値を示した。

また、表 5.2.5-2 に示した含水比の測定結果より、水は緩衝材ブロックの外側から浸透し、試験終了時点では、中央部にはまだ水が浸透していなかったことがわかる。緩衝材の飽和状態を示す含水比は、外側 > 内側 > 中央部という傾向を示しており、外側の含水比は約 20% と初期含水比（10.5%）のほぼ倍であった。2 番目に高い内側は 13～14% 程度であり、最も低い中央部の含水比は初期含水比と同程度であった。

緩衝材への水の浸透は試験孔の壁面と接する外側のブロック表面から主として浸透すると考えられる。また、その他の浸透経路としては、試験体設置時、すなわち緩衝材が膨潤する前に存在する緩衝材ブロック同士の境界やブロックと設置治具との隙間などからも浸透すると考えられる。緩衝材の内側の含水比が中央部よりも高かったのは、水が内側の治具を伝って侵入したためと推察される。

表 5.2.5-2 採取したコアの土質試験結果 (Case 1)

		上段 (1 段目)			中段 (4 段目)				下段 (6 段目)		
		内	中	外	内	中	外*		内	中	外
		No.11	No.4	No.2	No.3	No.10	No.1	No.6	No.12*	No.5	No.7
湿潤密度	$\rho_t$ Mg/m <sup>3</sup>	1.904	1.677	1.608	1.690	1.697	1.382	1.686	1.287	1.739	1.882
乾燥密度	$\rho_d$ Mg/m <sup>3</sup>	1.666	1.515	1.339	1.494	1.523	1.133	1.417	1.128	1.571	1.557
土粒子密度	$\rho_s$ Mg/m <sup>3</sup>	2.698	2.744	2.740	2.723	2.746	2.723	2.778	2.755	2.749	2.750
含水比	$w$ %	14.3	10.7	20.1	13.1	11.4	22.0	19.0	14.1	10.7	20.9
間隙比	$e$	0.619	0.811	1.046	0.823	0.803	1.403	0.960	1.442	0.750	0.766
飽和度	$S_w$ %	62.3	36.2	52.7	43.3	39.0	42.7	55.0	26.9	39.2	75.0
平均直径	$D$ cm	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
平均高さ	$H$ cm	5.630	3.524	5.074	5.565	3.936	4.525	6.336	6.053	3.813	4.553
コア体積	$V$ cm <sup>3</sup>	39.80	24.91	35.87	39.34	27.82	31.99	44.79	42.79	29.95	32.18

※ No.1、6 の違いは位置 (No.6 は側部土圧計付近で採取)

※ No.1、No.12 は密度が著しく低くコアの取得または採寸に難があったと考えられる。

## 5.2.6 Case2 の流出試験

### (1) 試験準備

#### 1) 注水設備および計測設備の設置

Case1 と同様。

#### 2) 土圧計の設置

Case1 と同様。

#### 3) 孔壁と緩衝材の隙間を対象としたベントナイトペレットの設置

本試験では、孔壁と緩衝材の隙間をベントナイトペレットで充填した。ベントナイトペレットは 4mm 径と 0.3mm 径を重量比 1 : 1 で混合し、投入は漏斗を用いた。ペレット投入量を表 5.2.6-1 に示す。また、ペレットの投入状況を図 5.2.6-1 に示した。

表 5.2.6-1 ペレット投入量のまとめ

製作量	未使用	回収分	投入量
40 kg	21 kg	3 kg	16 kg
隙間体積 (想定)	ペレット乾燥密度	想定充填重量	推定平均充填率
20 L	1.4 kg/L	28 kg	57 %



図 5.2.6-1 ペレット混合前 (左) / ペレット投入状況 (中) / 漏斗による投入状況 (右)

#### 4) 採水設備の設置

Case1 と同様。

### (2) 注水試験

#### 1) 試験条件

Case1 と同様。

## 2) 試験結果

### a 膨潤圧

図 5.2.6-2 に土圧と注水区間水圧の経時変化を示す。なお、図 5.2.6-2 中には表示されていないが、中部土圧は測定開始 (0 時間) から既に約 0.02 MPa であった (ロガー画面にて確認)。これは、図 5.2.5-10 に示した Case 1 の場合が 0MPa だったことと異なっている。試験初期に土圧がすでに高かった原因は、ベントナイトペレットの膨潤によって発生したものと考えられる。

上部/下部土圧については、Case 1 の場合と同様に、どちらもほぼ 0MPa であったが、350 時間経過後には、わずかに上昇し始めており、水のブロックへの浸潤が徐々にすすんだことが推測される。

中部土圧について、その上昇する速さを Case1 の場合 (図 5.2.5-10 参照) と比較すると、Case1 よりも緩やかであることがわかる。これは、試験装置の構造上、試験の初期ではペレットの体積拘束が不完全 (ペレットが膨潤し、図 5.2.3-3 に示す上下フランジ間の空間が完全に充填されるまで入り込む) であったための現象と考えられる。後掲 (図 5.2.6-5 参照) する試験体回収後の状況から、上下フランジ間にベントナイトが密に (多量に) 充填されていることがわかる。

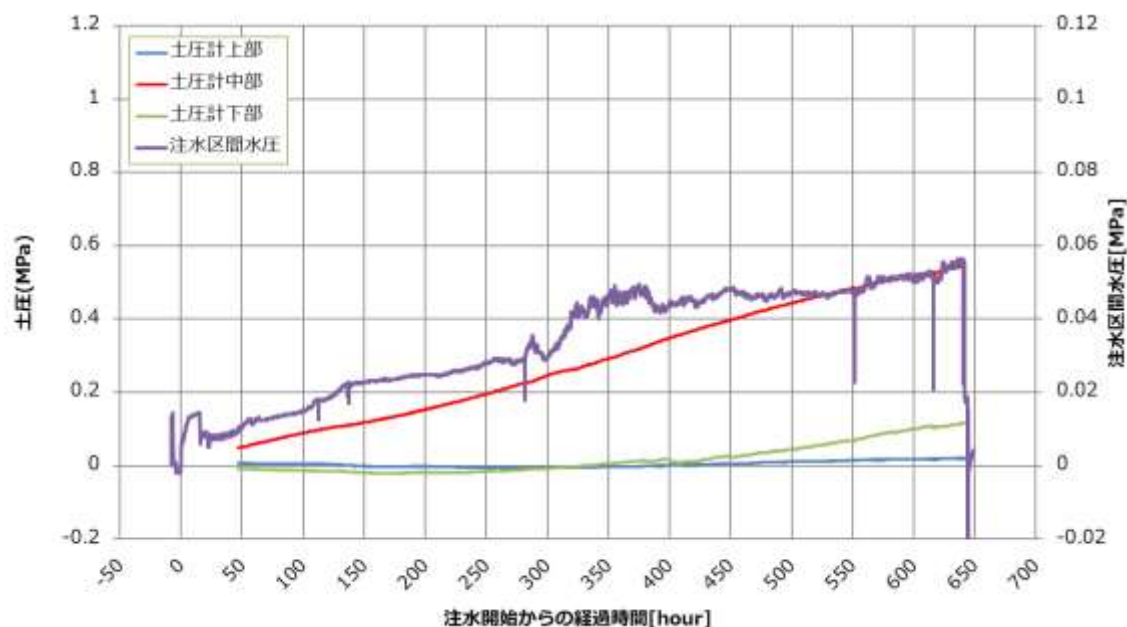


図 5.2.6-2 土圧の経時変化 (Case 2)

b 水圧／注水量流量

図 5.2.6-3 に注水区間水圧と注水流量の経時変化を示す。図 5.2.6-3 より、注水区間水圧はばらつきも少なく、緩やかに上昇している傾向がわかる。350 時間～550 時間では注水区間水圧は約 0.048MPa と概ね一定になり、550 時間～600 時間では 0.050MPa と若干値が上がった状態で一定となった。なお、図 5.2.6-3 からわかるように、試験を終了するまで、緩衝材の流出を示す水圧の急激な低下はみられなかった。

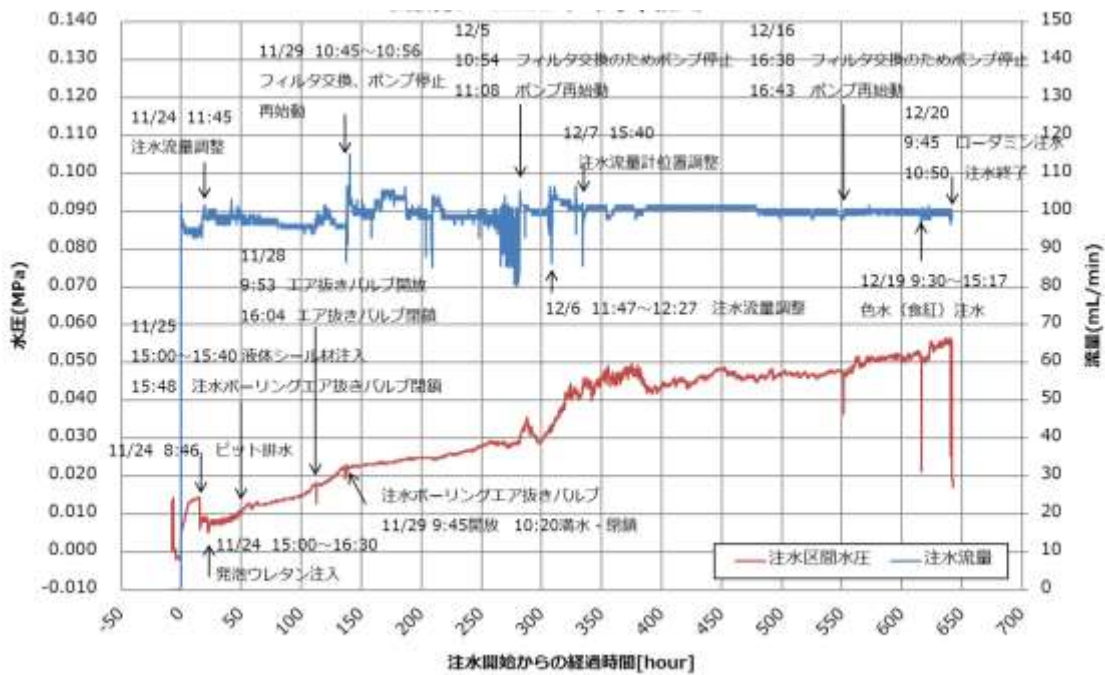


図 5.2.6-3 水圧・流量の経時変化 (Case 2)

### c 緩衝材の流出量

図 5.2.6-4 に採水の緩衝材濃度を注水区間水圧を示す。図 5.2.6-4 より、250 時間までは増加傾向にあり、注水区間水圧の増加傾向と同じ傾向であることがわかる。250 時間以降は注水区間水圧の変化傾向とも異なるようになった。これより、緩衝材の濃度から流出現象を把握することは難しいことがわかった。

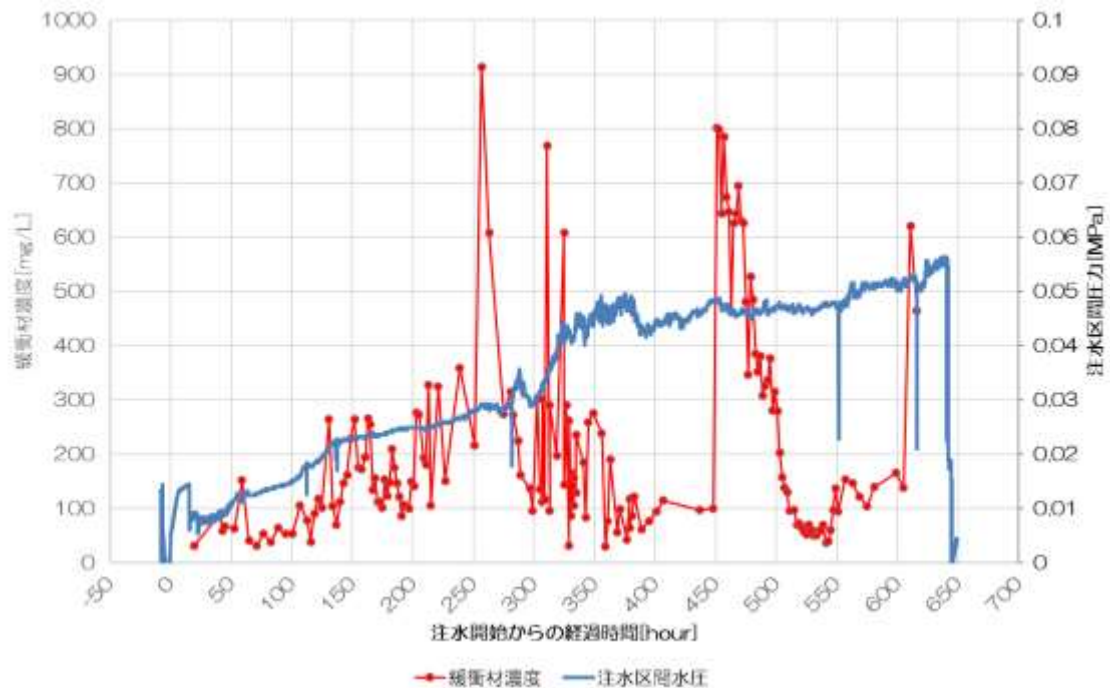


図 5.2.6-4 吸光度分析結果および注水圧の経時変化 (Case 2)

### (3) 試験後の緩衝材の状態

回収した試験体の状態を目視で確認したところ、図 5.2.6-5 に示すように、注水孔の部分（東側最下部）が赤く着色されていたことより、注水が緩衝材に接触したことがわかった。また、上下フランジ間に充填されたペレットにも水の浸入した箇所が確認できた。

緩衝材の飽和状態を目視確認した結果、最上段の緩衝材は、ベントナイトペレットと緩衝材ブロックの境界が確認できる箇所があった（図 5.2.6-6）。緩衝材ブロックの膨潤変形は試験体全体でみても小さく、乾燥時の寸法である 16.5cm 前後の長さを維持したブロックが見られた（図 5.2.6-7、図 5.2.6-8）。下の 2 段は Case 1 と概ね同程度で、試験孔壁と接する側（外側）から 5cm 程度が湿った状態にあった（図 5.2.6-9）



図 5.2.6-5 引き上げた試験体（東側）



図 5.2.6-6 緩衝材の状態（最上段）



図 5.2.6-7 緩衝材の状態（上から3段目）





図 5.2.6-8 緩衝材の状態（下から3段目）



図 5.2.6-9 緩衝材の状態（最下段）

#### (4) 緩衝材の密度測定・含水比測定

採取した試料は Case 1 と同様に土質試験を行った。試料は試験体の「最上段」、「中段」、「最下段」の3段を対象に「外側」、「中央」、「内側」の3か所から採取した。その結果を表 5.2.6-2 に示す。

表 5.2.6-2 より、採取した試料の乾燥密度は、試験体上段が平均して  $1.63\text{Mg/m}^3$ 、中段が平均して  $1.67\text{Mg/m}^3$ 、下段が平均して  $1.43\text{Mg/m}^3$  となり、全体的に Case1 より高い値を示した。これは、図 5.2.6-8 などからわかるように、試験孔壁と緩衝材の間にペレットを充填したことにより、緩衝材が拘束され、膨潤量が少なかったためと考えられる。

緩衝材の飽和状態を示す含水比は、試験孔壁から湧出する水と常に接する外側が高い傾向にあった。しかし、最大値が約 20%程度（外側の含水比）あった Case 1 と比較するといずれも低く、上段～下段まで、段の違いによる大きな差はみられなかった。これについても、緩衝材がペレットに覆われていたためと考えられる。

表 5.2.6-2 採取した試料の土質試験結果 (Case2)

			上段 (1 段目)			中段 (4 段目)			下段 (6 段目)		
			内	中	外	内	中	外*	内	中	外
			No.13	No.14	No.15	No.16	No.17	No.18	No.21	No.20	No.19
湿潤密度	$\rho_t$	Mg/m <sup>3</sup>	1.822	1.966	1.827	2.065	1.697	1.929	1.685	1.371	1.867
乾燥密度	$\rho_d$	Mg/m <sup>3</sup>	1.582	1.768	1.528	1.842	1.536	1.635	1.494	1.233	1.570
土粒子密度	$\rho_s$	Mg/m <sup>3</sup>	2.728	2.710	2.708	2.738	2.741	2.724	2.843	2.829	2.706
含水比	$w$	%	15.2	11.2	19.6	12.1	10.5	18.0	12.8	11.2	18.9
間隙比	$e$		0.724	0.533	0.722	0.486	0.785	0.666	0.903	1.294	0.724
飽和度	$S_w$	%	57.3	56.9	68.8	68.2	36.7	73.6	40.3	24.5	70.6
平均直径	$D$	cm	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
平均高さ	$H$	cm	2.784	1.953	3.813	1.863	1.290	2.821	3.456	2.031	3.942
コア体積	$V$	cm <sup>3</sup>	19.68	13.80	26.95	13.17	9.12	19.94	24.43	14.36	27.86

### 5.2.7 Case3 の流出試験

#### (1) 試験準備

##### 1) 注水設備および計測設備の設置

Case1 と同様

##### 2) 土圧計の設置

Case1 と同様

##### 3) 採水設備の設置

Case1 と同様

#### (2) 注水試験

##### 1) 試験条件

Case1 と同様

##### 2) 試験結果

###### a 膨潤圧

図 5.2.7-1 に土圧と注水区間水圧の経時変化を示す。中部土圧は、試験体定置完了後からゆるやかに上昇を始め、100 時間経過後から急激に上昇した。その後、約 0.8MPa に到達してからは若干低下したが、400 時間後から再度上昇を始め、試験終了時点で約 1MPa まで上昇した。Case 1 と試験条件は同じであったが、Case 1 が 0.8MPa で安定した傾向とは異なる傾向を示した。

上部／下部土圧計については、Case 1 と同様に試験期間中は 0 に近い値でほぼ横ばいであったが、試験終了時点で、わずかに上昇傾向を示し始めており、緩衝材ブロックへの水の浸潤が進んだことが推定される。

注水区間水圧と中部土圧を比較すると、試験開始から 400 時間までは両者は上昇速度は異なるがいずれも上昇傾向を示した。しかし、中部土圧計が 0.8MPa から再度上昇し始めた 400 時間経過後から、注水区間水圧は 0.06 MPa 程度で一定となり、変化傾向が異なるようになった。土圧が上昇しているにも関わらず、注水区間圧力が上昇しないことは、透水性が一定（ある程度透水性は高い状態であると考えられる）となった緩衝材の中を定常的に水が流れた（浸潤した）ためと推察される。

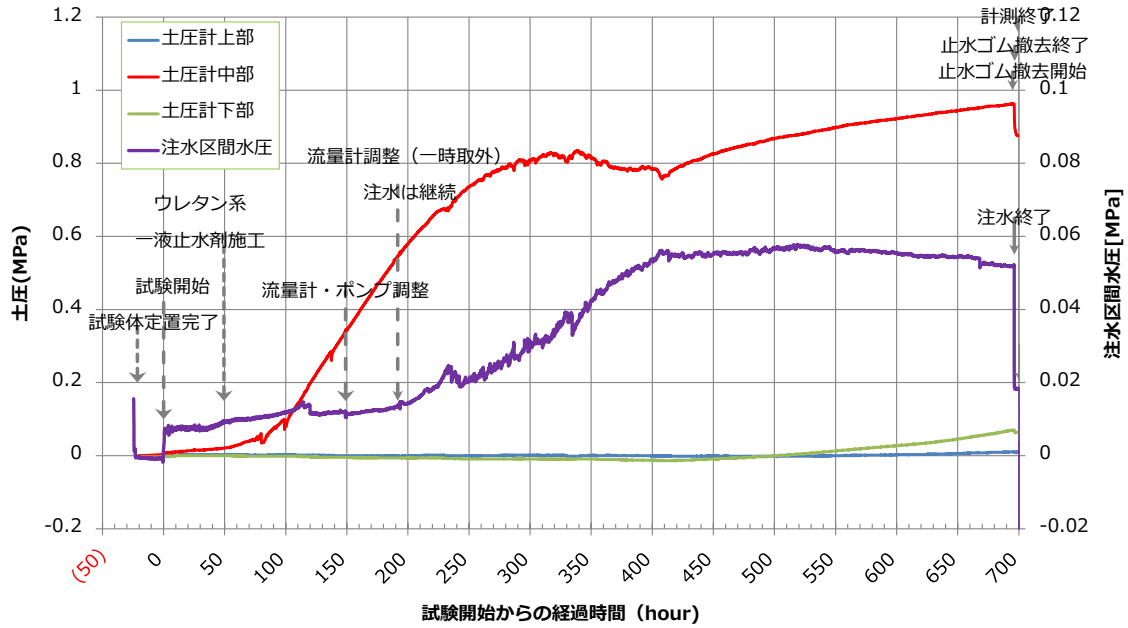


図 5.2.7-1 土圧の経時変化 (Case 3)

b 水圧／注水量流量

図 5.2.7-2 に注水区間水圧と注水流量の経時変化を示す。

注水区間水圧は試験開始（注水開始）後すぐに 0.008MPa 程度となり、その後ゆっくりと上昇して 0.05～0.06MPa 付近で安定した。この期間、大きな水圧低下等の変化は現れなかったことから、水みちを拡張するような現象は起こらなかったと考えられる。

400 時間以降、注水区間水圧が 0.05～0.06MPa で一定となったため、色水注入による水みち確認試験を実施した。水みちの確認は、注水孔から注入した色水が採水口から採取できるかによって判断した。今回の試験では、色水を連続約 18 時間注入した。その結果、採取した水は着色されていなかった。これより、試験孔と緩衝材の境界部には、注水孔から注入した水はほとんど流れていないことが考えられる。

蓋（フランジ）より下の試験孔と緩衝材の状況を把握するために、注水区間水圧と採水口につないだホース内の水位を比較した。図 5.2.7-3 に採水ホース内の水位と注水区間水圧の水位換算値の経時変化を示した。また、各水位の位置を表す図と写真を図 5.2.7-4 に示した。

図 5.2.7-3 より、採水ホース内の水位と注水区間水圧（水位換算）値は試験開始から 210 時間までは同じであった。その後、採水ホース内の水位は変化がなかったが注水区間水圧（水位換算）は上昇した。この違いは、緩衝材が膨潤し注水孔を閉塞したことにより、一定流量で試験孔内に注入されている水が試験孔内に流入されにくくなったためと考えられる。注水を一定流量で継続しているため、注水区間の水位（全水頭）は上昇したが、注水孔部の閉塞による試験孔内への注水が困難になったため、試験孔内の水位には変化が見られなかったと推察できる。さらに、採水ホース内の水位は 350 時間経過後程度から減少しており、注水孔からの試験孔内への水の供給がさらに低下したことが考えられる。なお、供給した水は岩盤（試験孔や注水孔）からの逸水したと考えられる。これは、色水が採水口からは採取できな

かったことと矛盾しない。

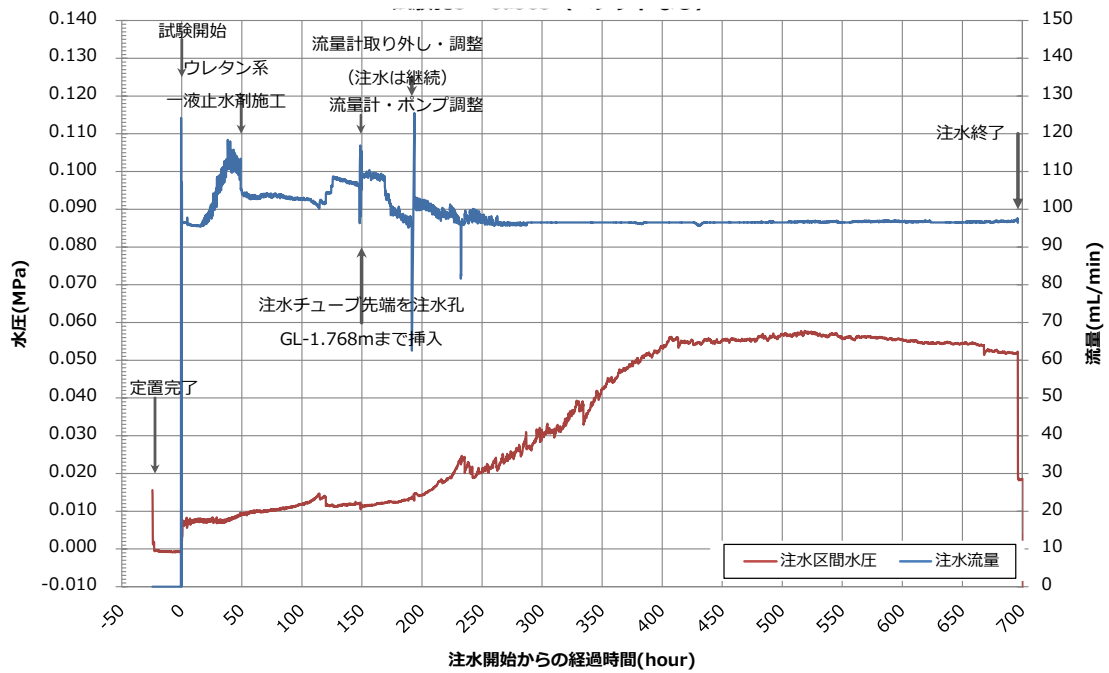


図 5.2.7-2 注水区間水圧・注水流量の経時変化 (Case 3)

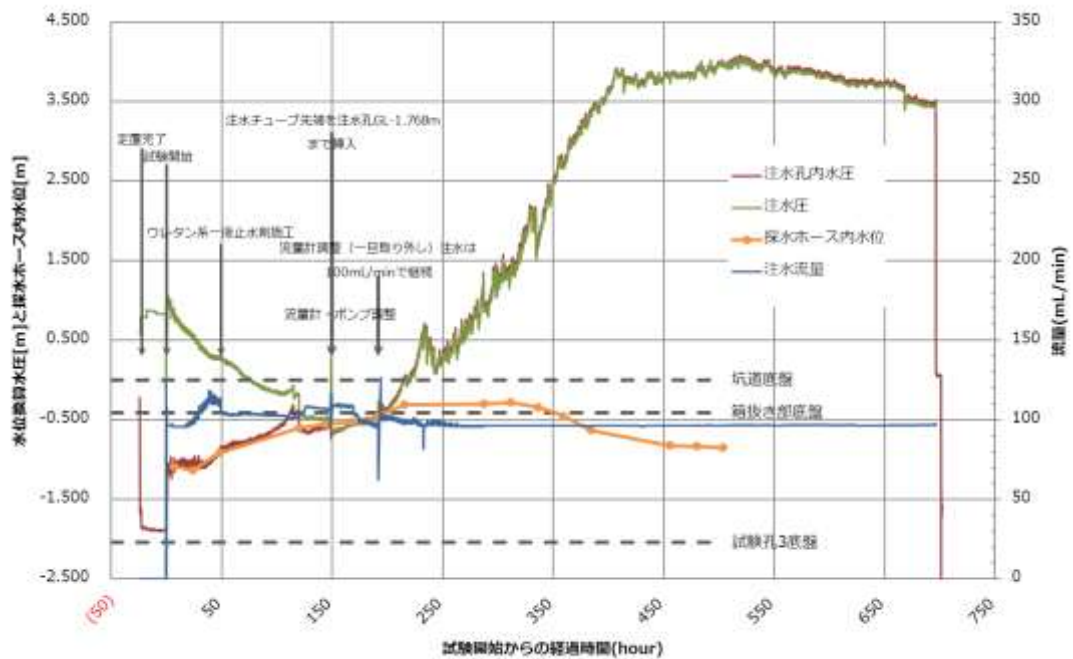
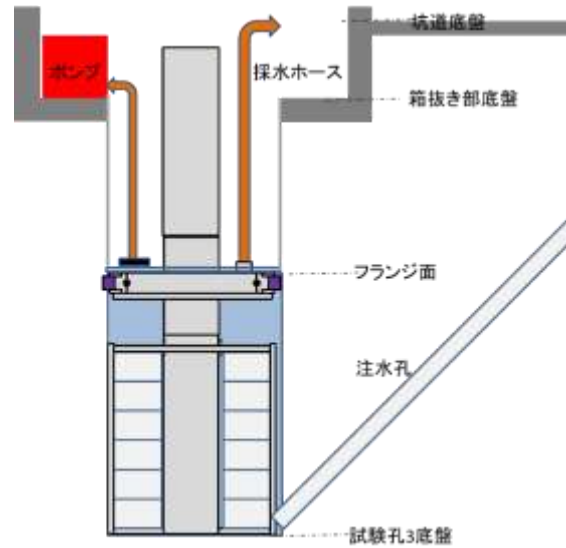


図 5.2.7-3 採水ホース内の水位と注水区間の圧力の水位換算値の時間変化



(a) 位置図



(b) 位置写真

図 5.2.7-4 試験状況における水位を示す位置図

c 緩衝材の流出量

図 5.2.7-5 に採水の緩衝材濃度と注水区間水圧の経時変化を示す。また、参考として蓋の上(図中では”フランジ上”)で採取した水の緩衝材濃度も併せて示した。なお、蓋の上の水は主として岩盤からの湧水考えられる。

図 5.2.7-5 より、採水ホースから採取したサンプルの緩衝材濃度は、試験開始から 350 時間後までは変化の傾向が注水区間水圧の上昇と連動していることがわかる。しかし、その後の変化傾向には違いがみられ、350 時間～400 時間では注水区間水圧の上昇に対し、緩衝材濃度は低下傾向と逆の傾向であった。また、450 時間以降は注水区間水圧は一定であったのに対し緩衝材濃度は上昇傾向にあった。今回の試験結果では、緩衝材濃度から緩衝材の流出現象を把握することは困難であった。

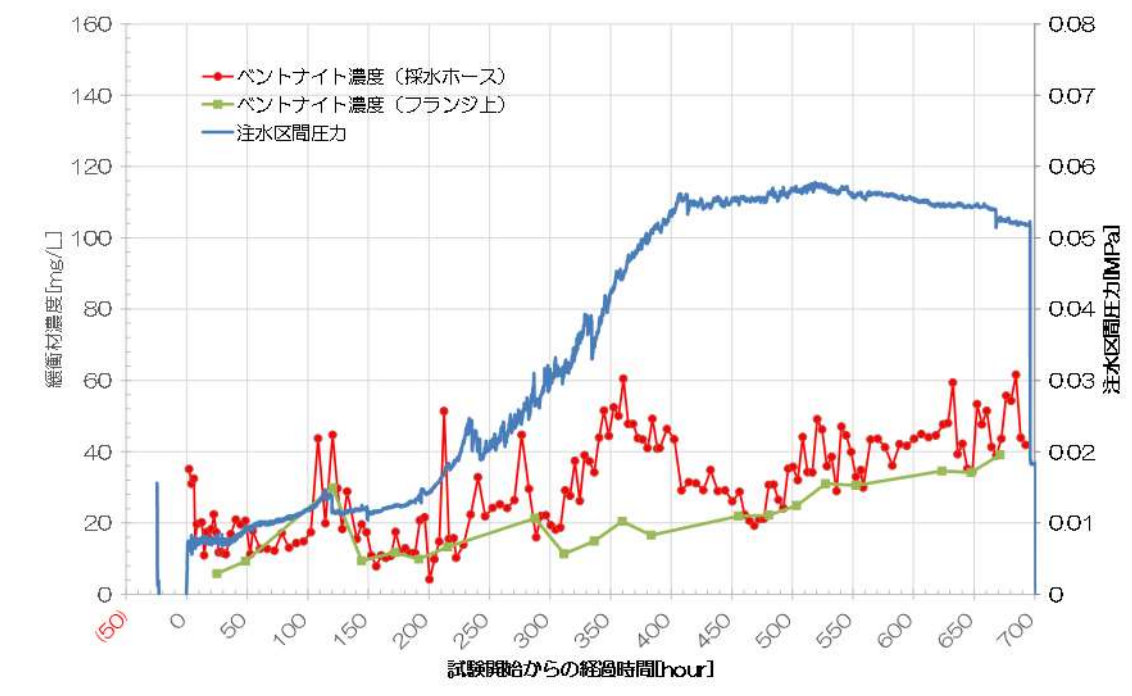


図 5.2.7-5 採水の緩衝材濃度の経時変化 (Case 3)

### (3) 試験後の緩衝材の状態

前述したように、水みちの有無を確認するため、約 18 時間継続して着色料としてローダミン B の溶液 (5ppm) を注水した後、試験体を回収した。なお、湧水移行経路について、岩盤内を經由して試験孔内に湧出したかどうかを確認するため、試験体回収前に、蓋より上部の試験孔壁面を目視観察した。その結果、着色された部分は認められなかった。

回収した試験体の表面の状態を目視で確認した。その結果を図 5.2.7-7 に示す。注水孔と接する位置では緩衝材に凹んでいたが、赤い着色は認められず、明瞭な上下間の水みちの痕跡は認められなかった。ただし、試験体回収時に孔壁に緩衝材が擦れて染料が消失した可能性も考えられる。

また、試験体引回収後、試験孔の壁面についてカメラで観察した。図 5.2.7-7 に試験孔壁面の写真を示す。図 5.2.7-7 からわかるように色水の痕跡は認められなかった。ただし、試験体回収後の注水孔近傍には着色が認められた (注水孔先端付近の拡大写真図 5.2.7-8 参照)。これは、試験体によってせき止められていた注水孔内の残留水 (色水) が、試験体撤去に伴って試験孔内に流下したためと考えられる。

今回実施した観察結果より、注水孔が膨潤した緩衝材で閉塞された (時期は図 5.2.7-3 の 200 時間と推察される) ため、注入した水の多くは試験孔内に流入せず、周辺岩盤内に逃げたと考えられる。水の岩盤への浸透経路は、注水孔先端付近の割れ目、図 5.2.5-2 に示す注水孔のパッカーかしめ部付近の割れ目、試験孔底盤や壁面が考えられる。

図 5.2.7-9~図 5.2.7-11 に回収した試験体を示す。緩衝材ブロックは、いずれも内側が乾いた状態であることがわかる。





図 5.2.7-6 回収した試験体の状況（東側）

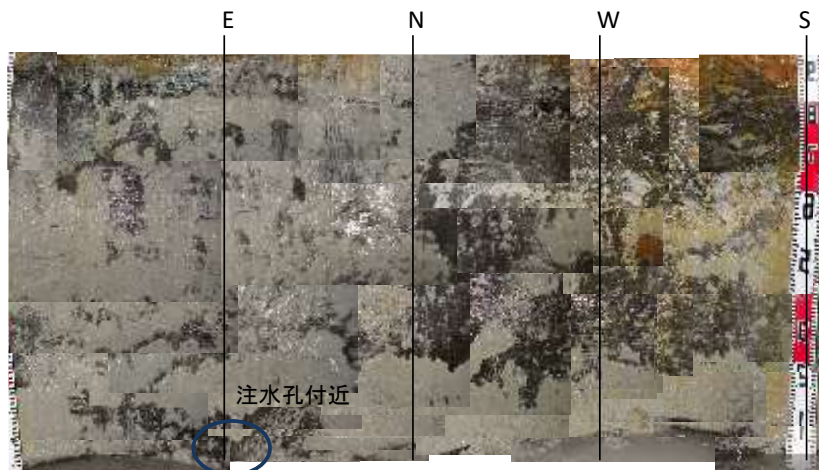


図 5.2.7-7 試験体回収後の試験孔の壁面状況



図 5.2.7-8 試験体回収後の試験孔の壁面（拡大）



図 5.2.7-9 緩衝材の状態（上から 3 段目）



図 5.2.7-10 緩衝材の状態（上から 4 段目）



図 5.2.7-11 緩衝材の状態（最下段）

#### (4) 緩衝材の密度測定・含水比測定

採取した試料は Case 1 と同様に土質試験を行った。試料は試験体の「最上段」、「中段」、「最下段」の 3 段を対象に「外側」、「中央」、「内側」の 3 か所から採取した。その結果を表 5.2.7-1 に示す。

緩衝材の乾燥密度は、上段が平均して  $1.82\text{Mg/m}^3$ 、中段が平均して  $1.67\text{Mg/m}^3$ 、下段が平均して  $1.74\text{Mg/m}^3$  (No.34 を除く) となった。初期の乾燥密度である  $1.92\text{Mg/m}^3$  の約 95~87% に入る値であり、Case1 や 2 と比較しても高い値であった。上段の中央と内側は若干高く、中段の外側がやや低い値であった以外は、同程度であった。

緩衝材の飽和状態を示す含水比は、試験孔壁面からの水と接する外側は高い傾向にあり、20% 程度の値を示していたが、上段の外側の含水比は例外的に低い値 (14.1%) を示した。

表 5.2.7-1 より、乾燥密度が外側 > 内側 > 中央の順で大きい傾向や、含水比が段による違いがないことがわかる。

表 5.2.7-1 採取した試料の土質試験結果 (Case 3)

		上段 (1 段目)			中段 (3 段目)			下段 (6 段目)		
		内	中	外	内	中	外	内	中	外※
		No.25	No.36	No.35	No.28	No.33	No.32	No.27	No.26	No.34
湿潤密度	$\rho_t$ Mg/m <sup>3</sup>	2.094	2.117	1.974	1.996	1.955	1.903	1.997	1.961	2.151
乾燥密度	$\rho_d$ Mg/m <sup>3</sup>	1.834	1.899	1.730	1.713	1.753	1.537	1.720	1.754	1.778
土粒子密度	$\rho_s$ Mg/m <sup>3</sup>	2.706	2.708	2.690	2.713	2.705	2.712	2.709	2.725	2.680
含水比	$w$ %	14.2	11.5	14.1	16.5	11.5	23.8	16.1	11.8	21.0
間隙比	$e$	0.475	0.426	0.555	0.584	0.543	0.764	0.575	0.554	0.507
飽和度	$S_w$ %	80.9	73.1	68.3	76.7	57.3	84.5	75.9	58.0	111.0
平均直径	$D$ cm	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
平均高さ	$H$ cm	6.522	3.986	4.914	6.739	9.067	5.210	7.167	5.430	4.373
コア体積	$V$ cm <sup>3</sup>	46.10	28.18	34.74	47.64	64.09	36.83	50.66	38.38	30.91

※ No.34 の飽和度は高すぎるので試料取得に難があったと考える

## 5.2.8 総合評価

試験 Case による違いを検討するため、注水区間水圧と各設置位置ごとの土圧の比較図を図 5.2.8-1～図 5.2.8-3 に示す。

図 5.2.8-1 と図 5.2.8-2 より、上部と下部の土圧は、どちらも上昇が顕在化する時間は試験開始から 350 時間経過後であり、最大値となった 0.1MPa に達した時間も 600 時間と同じ挙動であったことがわかる。また、図 5.2.8-3 より、中部土圧は、同じ試験条件(緩衝材の乾燥密度が 1.9g/m<sup>3</sup>、蓋による緩衝材の体積拘束、緩衝材と試験孔の隙間へのペレット充填なし)の Case 1 と Case3 では同じ挙動を示していることがわかる。この結果により、試験の再現性が確認され、試験方法の妥当性を検証できた。

図 5.2.8-3 より、Case 1 と Case3 の中部土圧計(試験孔側壁に設置)の値は、100 時間経過後から急上昇していることがわかる。これより、緩衝材が孔壁壁面まで(約 2cm)膨潤する時間は 100 時間程度を要することがわかった。また、中部土圧の最大値はどちらも 0.8MPa～1MPa の範囲でほぼ一定となった。これは、緩衝材の膨潤した部分が遮水機能を発揮し、緩衝材の内側への水の浸潤速度が遅くなった結果、膨潤速度も遅くなり、今回実施した試験時間内では顕著な圧力変化はしようじなかったと考えられる。なお、膨潤圧が一定となったことから、今回実施した試験条件における緩衝材の膨潤圧は 0.8MPa と判断した。一方、Case2 の中部土圧は上昇する時間が他の Case より緩やかであることがわかる。これは、5.2.6 で考察したとおり体積拘束が不十分であるためと考えられる。ただし、前掲した図 5.2.6-7 や図 5.2.6-8 からわかるように緩衝材ブロック自体はほとんど変形していないことから、ペレットの充填が緩衝材の密度低下の抑制に寄与したことがわかる。

各 Case の注水区間水圧を、図 5.2.8-1 で比較すると、いずれの Case も水圧は 150 時間～200 時間をかけて 0.05MPa 分を緩やかに上昇し(たとえば、Case3 の注水区間水圧の場合、試験経過時間の 200 時間から 400 時間までで、水圧が 0.01MPa から 0.058MPa に達する)、最大値約 0.06MPa で一定となることがわかる。また、注水区間水圧は 0.06MPa より増加することはなく、緩衝材の流出の指標となる急激な低下も見られなかった。平成 27 年度に実施した蓋を使用しない試験では、水圧の急激な低下がみられ緩衝材の流出を確認している。したがって、緩衝材流出対策として蓋などによる緩衝材の体積拘束が有効であることがわかった。

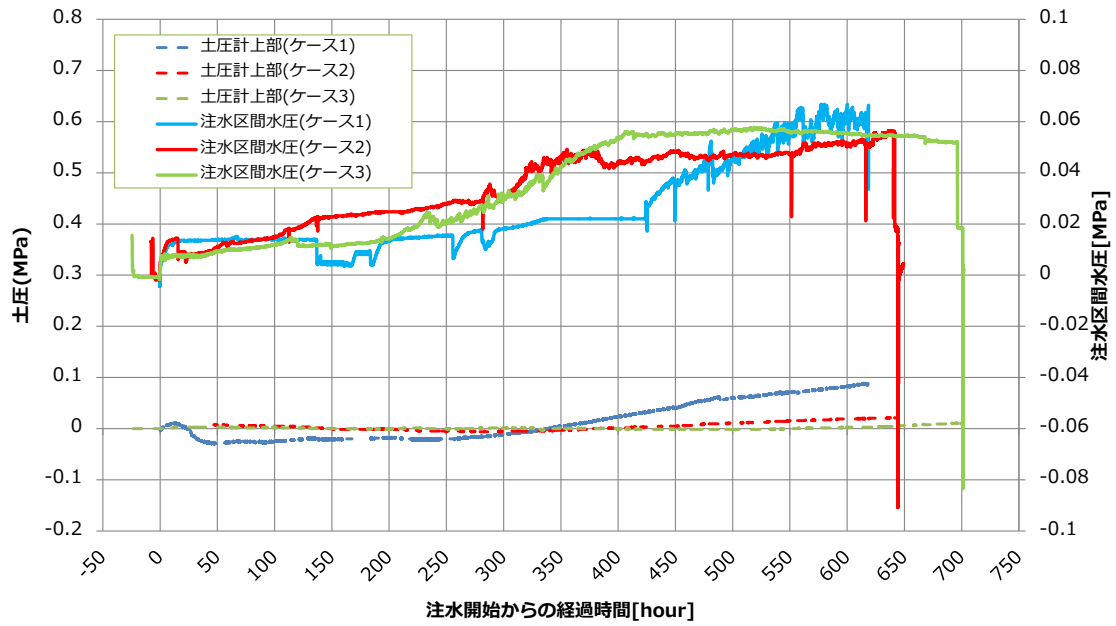


図 5.2.8-1 Case 1～Case3 の注水区間水圧と上部土圧の経時変化

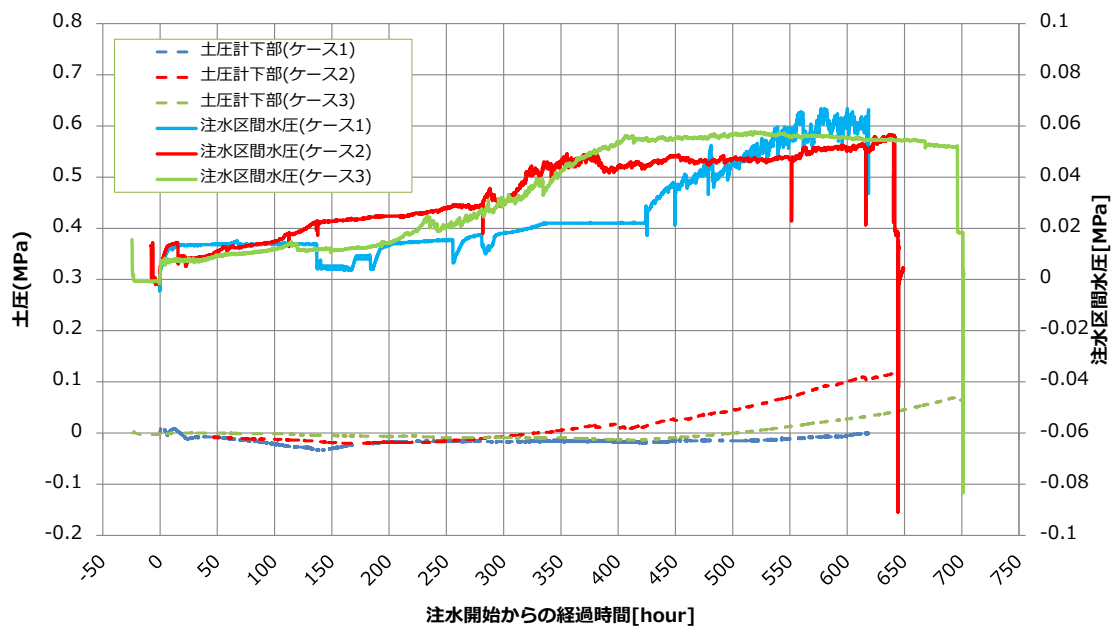


図 5.2.8-2 Case 1～Case3 の注水区間水圧と下部土圧の経時変化



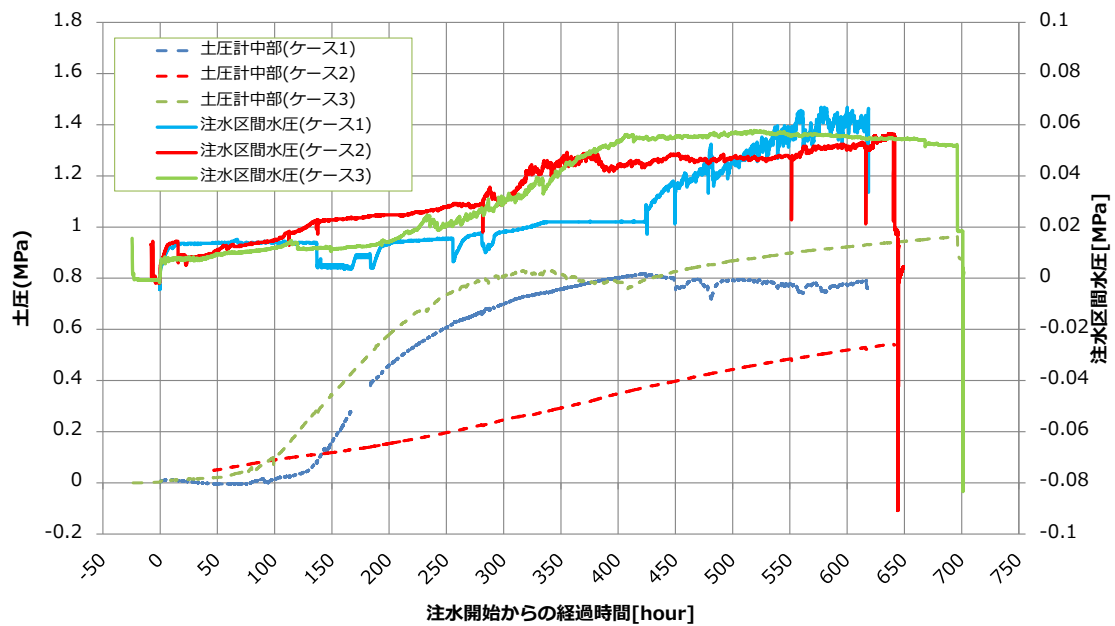


図 5.2.8-3 Case 1～Case3 の注水区間水圧と側部土圧の経時変化

## 5.2.9 まとめ

長期試験、Case1～Case 3 の試験結果を、以下にまとめる。

長期試験結果（緩衝材の初期乾燥密度  $1.9\text{Mg}/\text{m}^3$ 、試験体と孔壁間の  $2\text{cm}$  の隙間にはペレット充填せず、緩衝材上部に蓋は未設置）

- 緩衝材を蓋などによって体積拘束しない場合、注水流量が  $0.1\text{L}/\text{min}$  という低流量にかかわらず、緩衝材と孔壁の境界部で緩衝材の流出が生じた。
- 緩衝材の流出濃度と流出現象の関係は明瞭ではない。
- 緩衝材は冠水後 3800 時間（試験実施時間相当）で飽和度は 93%以上となった。
- 常時水と接してためゲル状となった緩衝材の乾燥密度は、いずれも  $1\text{Mg}/\text{m}^3$  よりも低い値であった。

Case1、Case3 試験結果（緩衝材の初期乾燥密度  $1.9\text{Mg}/\text{m}^3$ 、試験体と孔壁間の  $2\text{cm}$  の隙間にはペレット充填せず、緩衝材上部に蓋設置）

- 緩衝材を蓋などによって体積拘束した場合、緩衝材の流出は認められなかった。
- 緩衝材の流出濃度と流出現象の関係は明瞭ではない。
- 本試験条件での緩衝材の膨潤圧は  $0.8\text{MPa}\sim 1\text{MPa}$  程度で、圧力の発生は冠水後 100～130 時間経過後であった。



- 注水区間水圧は 0.06MPa で安定し、増減することはなかった。
- 試験終了後の緩衝材の乾燥密度は、水と接触する機会が多い場所順（外側、内側、中央）に小さい。

Case2 試験結果（緩衝材の初期乾燥密度 1.9Mg/m<sup>3</sup>、試験体と孔壁間の 2cm の隙間にはペレットを充填、緩衝材上部に蓋設置）

- 緩衝材を蓋などによって体積拘束した場合、緩衝材の流出は認められなかった。
- 試験体と孔壁間の 2cm の隙間にはペレットを充填した結果、緩衝材の変形が抑制された（ほとんど膨潤しなかった）。
- 試験終了後の緩衝材の乾燥密度は、外側、内側、中央で大きな違いはみられなかった。

今後の検討課題

- 緩衝材が膨潤し注水孔を閉塞した後に注入した水の移行経路を確認する。岩盤への逸水があるのかどうかを調べる。
- 緩衝材と孔壁間の隙間へのペレット充填方法を確立する。湿潤状態の狭い隙間にペレットを充填することは困難を伴うため、均質に充填する方法を確立することが必要である。
- 緩衝材の流出量と水圧、または注水流量の関係を明確にする。

## 第5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] 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－、JNC TN1400 99-020～023，1999.

## 第6章 再冠水時の緩衝材のモデル化・解析に関わる検討

### 6.1 緩衝材施工品質に関する解析的検討

#### 6.1.1 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、緩衝材の定置時に処分孔への湧水が多いと緩衝材の施工品質に影響を与える可能性がある。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、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懸念されている（原環センター、2015）[1]。また、湧水に対しては、個々の処分孔ごとに必要に応じて湧水対策を行うことを検討しており、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。グラウトによる湧水量低減対策は、周辺地山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、特に割れ目が主要な水みちとなっている岩盤部においては、割れ目をモデル化した水理モデルにより効果を評価する必要がある。

##### (2) 研究の目的

本検討は、高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る緩衝材の流出現象の定量的把握とその工学的対策に関する研究（岩谷ら、2016）[2]の一環として、処分場の操業期間中における緩衝材の品質を確認するため、品質に影響を与える可能性のある処分孔の湧水量について評価することを目的とする。また、処分孔の湧水量を低減するための工学的対策が処分孔と処分坑道周辺の水理場に与える影響についても評価を行う。特に、割れ目が主要な水みちとなるような岩盤部の透水性に着目し、「割れ目ネットワーク」をモデル化し、さらに、そのモデル内に坑道・処分孔・工学的対策を設定して、坑道・処分孔に想定される地下水流入量、さらに、工学的対策工の効果について解析的な検討を行う。

##### (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28年度）はその3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。

- 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（その1）

- 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（その 2）

- 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（その 3）

- 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

- 埋戻し後の処分孔への地下水流入と工学的対策

#### 平成 29 年度（その 4）

- ①埋戻し後の処分坑道、処分孔への通過流量の算定
- ②通過流量低減のための工学的対策の効果の評価

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。そして、3 年目にあたる本年度（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。

後段の埋戻し後の検討については、最終年度の 4 年目に実施する計画としている。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工学的対策による流入量低減効果を解析的に検討する。この検討により、割れ目が支配的な流動場における地下水流入の安全評価へ与える影響や工学的対策の効果について評価を行う。

#### (4) 本年度の検討内容

これまでの検討を踏まえ、本年度は、処分場パネルを想定した坑道掘削の進展に伴う湧水量変化の評価を行った。具体的には、図 6.1.1-1 に示すように実際の処分場パネルのレイアウトを想定し、複数の処分坑道を設定した「割れ目ネットワークモデル」を構築し、周辺の処分坑道が処分孔の湧水量に与える影響について、浸透流解析を行った。これによって、実際の処分場に近い水理場を設定し、その上で、掘削後のグラウト施工手順が処分孔の湧水量に与える影響について

の検討を行った。さらに、グラウトのモデル化手法に関する検討や、緩衝材定置後の処分孔の湧水量への影響検討についても予察的な検討を行った。

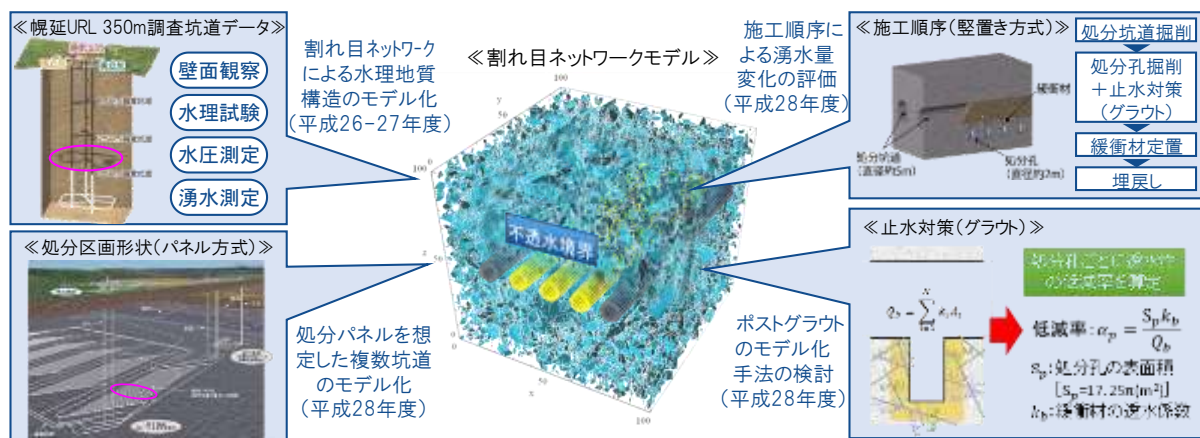


図 6.1.1-1 割れ目ネットワークモデルを用いた平成 28 年度の検討概要

1) 坑道掘削・定置・埋戻しの順序の整理

NUMO（原子力発電環境整備機構）より得られる情報[3]に基づき、想定される操業期間中の坑道掘削・定置・埋戻しの順序の整理を行った。これにより処分孔の湧水量に影響を与えると考えられる周辺の処分坑道の掘削、工学的止水対策の施工順序について検討し、解析的な検討を実施するケースを設定した。

2) 複数の処分坑道が処分孔の湧水に与える影響評価

- ① 複数の処分坑道を考慮した水理地質構造モデルの構築を行った。平成 27 年度、幌延 URL の水理データに整合するように作成した 3 次元水理地質構造モデル（10 リアライゼーション）を基本とし、モデルに処分坑道を複数設定した。
- ② ①において作成した各水理地質構造モデルに対し浸透流解析を実施し、処分坑道への湧水量を算定した。この湧水量と、平成 27 年度実施した処分坑道 1 本の場合の解析結果との比較を行った。また、境界条件の設定が適切であることを確認し、基本となる水理地質構造モデルを決定した。
- ③ ①及び②において作成したモデル中央の処分坑道内に、10 か所の処分孔を設定し、各水理地質構造モデルで、処分孔の掘削時における処分坑道及び処分孔の湧水量を算定した。この解析結果と、平成 27 年度実施した処分坑道 1 本の場合の解析結果との比較を行い、周辺の処分坑道を掘削したことによる処分坑道及び処分孔の湧水量への影響を評価した。

3) グラウトの施工手順を考慮した処分孔湧水の評価

- ① 平成 27 年度は、処分孔周辺のグラウトによる止水対策領域に相当するパイプネットワーク

の透水係数をすべて一定の割合で低下させることによってグラウトの止水効果を表現したが、本年度はグラウトによる止水対策領域の透水性を、所定の透水係数相当に低減させることによって表現する方法の検討を行った。平成 27 年度作成した水理地質構造モデルのうち、1 リアライゼーションで計算を行い、両者の違いによる比較検討を行った。

- ② 平成 27 年度はグラウトの止水効果を、対象とする処分孔すべてに同時に反映させるという条件で解析を行ったが、本年度は湧水量の大きい処分孔から順次反映させることで、対象孔に隣接する処分孔の湧水量への影響を評価した。

#### 4) 緩衝材の定置後における処分孔への湧水量の評価

処分孔に緩衝材が定置された後の処分孔の湧水量および圧力を計算した。これにより緩衝材を定置することによる処分孔の湧水量への影響を検討した。

### 6.1.2 坑道掘削・定置・埋戻しの順序の整理

#### (1) 検討方針

本章では、NUMO より得られる情報[ 3 ]等を参考にして、想定される操業期間中の坑道掘削・定置・埋戻しの順序を整理した。また、施工順序の前提条件となる処分場の地下施設的设计条件や、操業期間中において緩衝材の品質に影響を与える湧水量の定量的な評価に関する情報を整理した。そして、これらの情報から、周辺の坑道掘削や隣接する処分孔における止水対策など、湧水量に影響を与える事象をまとめるとともに、次章以降の解析的な検討を進めるうえで有用となる条件設定や評価方法に関連する事項を整理した。

#### (2) 処分場設計の基本的な考え方

##### 1) 処分場の設計フロー

処分場の主な設計対象を図 6.1.2-1 に示す。主な設計対象は、地上施設と地下施設、および地下施設に含まれる人工バリアである。高レベル放射性廃棄物処分における人工バリアは、主にオーバーパックと緩衝材で、このほかにも、地下施設における坑道の寸法や支保工、プラグ等が設計対象となっている。

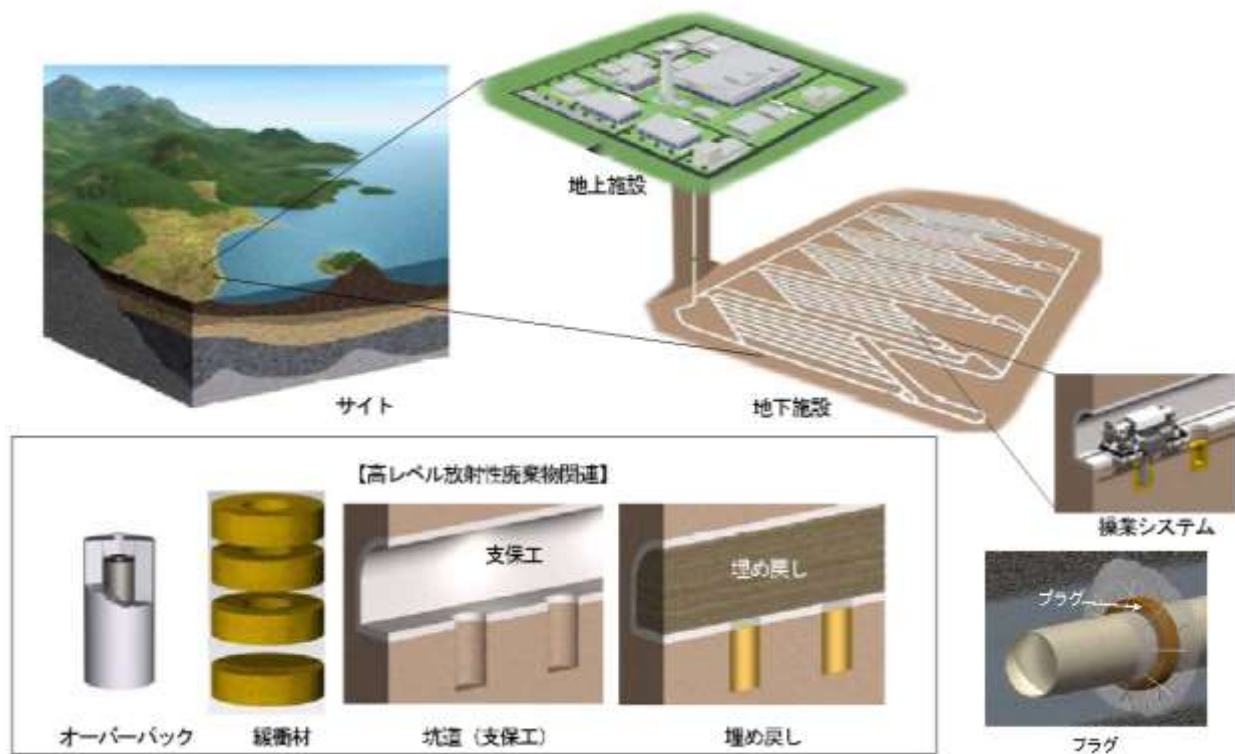


図 6.1.2-1 処分場の設計対象となる構成要素  
(NUMO、2016 に基づく) [4]

処分場の設計フローを、図 6.1.2-2 に示す。処分場の設計は、多様な地質環境を考慮し、複数の処分場概念について検討される。処分場概念の選定後、処分場の構成要素に対する要求事項を参照して、必要な性能が満足されるように設計要件が設定される。設計に際しては、この設計要件に基づいて、まず、人工バリアの設計が行われ、緩衝材等の仕様が決定される。そして、作業環境や閉鎖後に発生する事象を想定したうえで、構成要素に期待される性能を確保しながら、施設全体の設計が進められる。その後、安全性を評価し、有意な影響があると判断された場合には、必要に応じてフィードバックして仕様等が見直され、それでも性能の確保が困難とされる場合は、他の設計オプションまで立ち戻り検討が行われる。





図 6.1.2-2 処分場の設計フロー  
(NUMO、2016 に基づく) [3]

わが国に分布する岩種は、第四紀堆積岩類、第四紀火山岩類、新第三紀堆積岩、先新第三紀堆積岩、新第三紀・先新第三紀火山岩類、新第三紀・先新第三紀深成岩類変成岩類の7種類に大別される。このうち、第四紀堆積岩類は一般的に固結度が低く、また、第四紀火山岩類はおもに第四紀火山の周辺に分布することから、これらの岩種はサイト選定時の検討対象から除外される。さらに、新第三紀・先新第三紀火山岩類および変成岩類については、地下深部における分布は広くないと推定され、それぞれ先新第三紀堆積岩類および新第三紀・先新第三紀深成岩類と類似した特徴を有していることから、候補母岩として検討する先新第三紀堆積岩類および新第三紀・先新第三紀深成岩類に適用する考え方や手法の応用により、処分場の設計および安全評価における対応が可能であるとされている。結果的に、表 6.1.2-1 に示す新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類、新第三紀・先新第三紀深成岩類（以下、深成岩類という）が候補母岩とされ、この3岩種について、サイト選定で想定される多様な地質環境を対象としたセーフティケースが示されている。

表 6.1.2-1 対象母岩と処分場の設置深度  
(NUMO、2016 に基づく) [3]

時代・岩種	新第三紀堆積岩類	先進第三紀堆積岩類	深成岩類
水みち構造	粒子間隙/割れ目	割れ目/層理面/粒子間隙	割れ目/岩脈
透水係数(m/s)	$3 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-8}$
深度(m)	300-500	300-1000	300-1000

坑道型処分は、定置方法に応じて坑道分散型と坑道集積型の処分場概念に分類される。処分場内の温度の上昇を抑制するために、放射性廃棄物の発熱特性に応じて、前者は発熱量が大きなガラス固化体に対して適用され、さらに廃棄体の定置方向に応じて、縦置き方式と横置き方式が検討されている。また、縦置き方式であればブロック定置方式、横置き方式であれば PEM 方式が有望と考えられている。図 6.1.2-3 に、高レベル放射性廃棄物処分における廃棄体定置方式の模式図を示す。

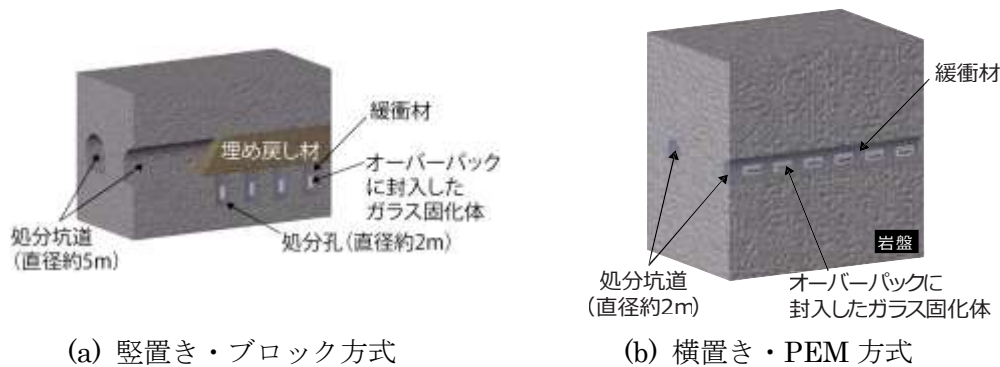
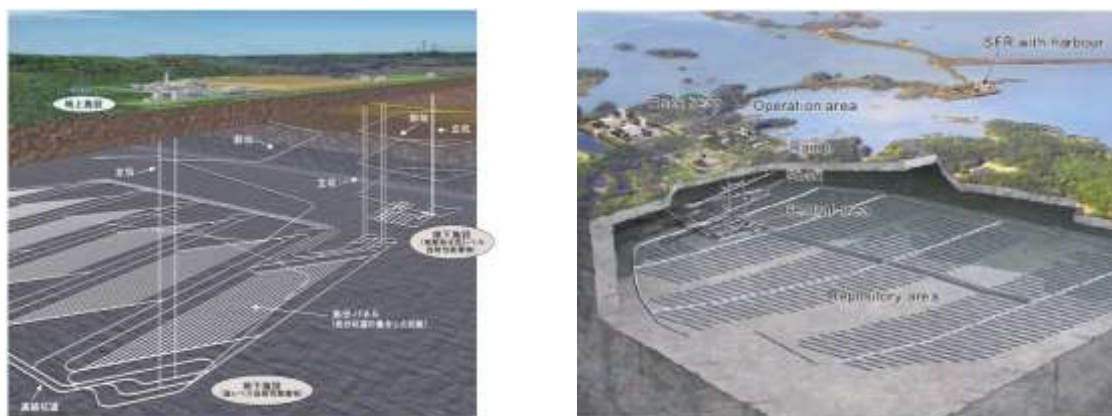


図 6.1.2-3 廃棄体定置方式  
(NUMO、2009 に基づく) [5]

地下施設は、地上施設から地下施設に廃棄体および人工バリアを搬送するアクセス斜坑および連絡坑道、廃棄体を人工バリアとともに埋設するための処分坑道、さらに換気・排水、掘削ズリの搬出、作業者の出入りのための複数のアクセス立坑で構成される。地下施設の設計オプションとしては、一群の処分坑道がそれを周回する坑道により取り囲まれる構造となっている処分パネル型と、処分坑道が連絡坑道に直接片側だけ連結した構造となっているフィッシュボーン型についての検討が進められている。図 6.1.2-4 に地下施設のレイアウトの概念図を示す。



(a) パネル方式 (NUMO、2009) [5]

フィッシュボーン方式 (SKB、2013) [6]

図 6.1.2-4 地下施設の設計オプション

## 2) 緩衝材の設計

緩衝材とは、放射性廃棄物の隔離をより確実なものとする人工バリアのうちの一つである。緩

衝材は、珪砂混じりベントナイトの乾燥密度および厚さで仕様が規定される。

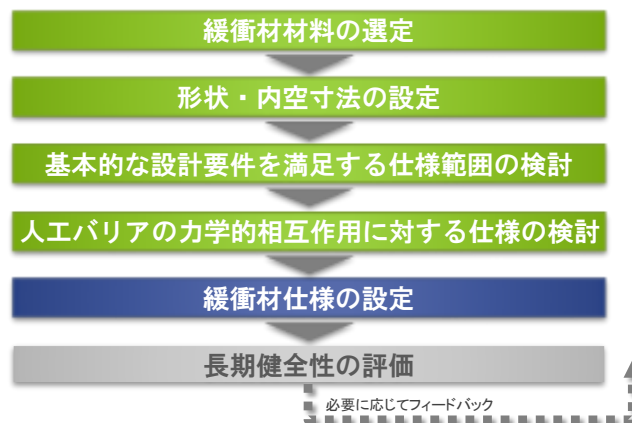
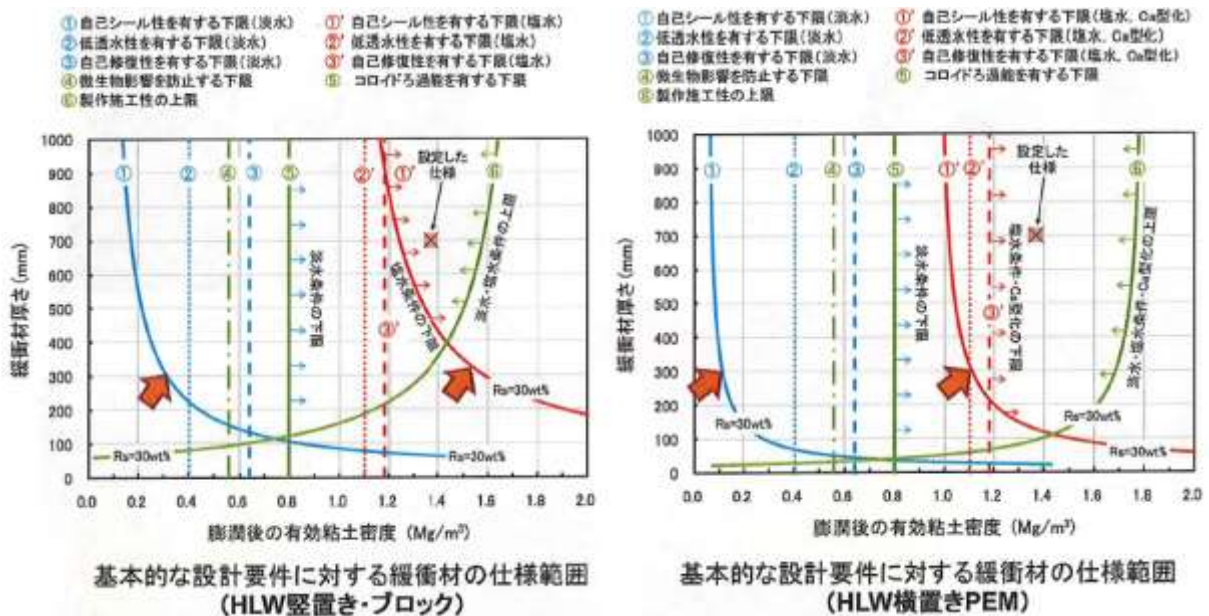


図 6.1.2-5 緩衝材仕様の設定フロー  
(NUMO、2016 に基づく) [3]

図 6.1.2-5 に緩衝材仕様の設定フローを示す。地層処分システムとしての隔離・閉じ込めを確保するための具体的な安全機能を実現するために、オーバーパックや緩衝材などの人工バリアに対する設計要件が定義され、これらを踏まえて人工バリアの設計仕様が決定される。NUMO 資料 [3]によれば、緩衝材の品質に関する安全機能として「移流による移行の抑制」、「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」を設定している。また、緩衝材の安全機能の確保や工学的成立性の確保に必要な設計要件として、「低透水性」、「コロイドろ過能」、「自己シール性」、「自己修復性」、「製作施工性」を設定している。緩衝材の設計要件を表 6.1.2-2 に示す。

表 6.1.2-2 緩衝材の設計要件  
(NUMO、2016 に基づく) [3]

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 <sup>3</sup> 以下



設計項目には、緩衝材の有効粘土密度と厚さがあり、各設計要件でそれを満たす使用範囲が定められている。ブロック方式、PEM方式に対しては、図 6.1.2-6 のように具体的な仕様範囲が示されている。これより、各要件を満足する地下水条件等によらない共通の仕様は、海水系地下水条件および Ca 型化の仕様範囲内で設定することになる。この仕様範囲内の平均的な有効粘土密度は  $pe=1.4Mg/m^3$  程度となるので、この値が合理性と裕度とをバランスした目安になると考えられている。

緩衝材厚さについては、基本的な設計要件を満足する仕様範囲に加えて、人工バリアの力学的相互作用の観点から仕様の成立範囲を設定する。図 6.1.2-7 は、オーバーパックに作用する外力として、オーバーパックの腐食膨張（腐食厚さ 40mm）による緩衝材圧密反力に加え、廃棄体定置深度の地下水静水圧が作用するとした場合の、オーバーパック耐圧厚さと緩衝材（ $pe=1.37Mg/m^3$ ）の厚さの関係を示している。オーバーパック耐圧厚さをある程度小さくすることを考慮すると、緩衝材厚さは 400mm 以上確保するのが好ましいとされている。

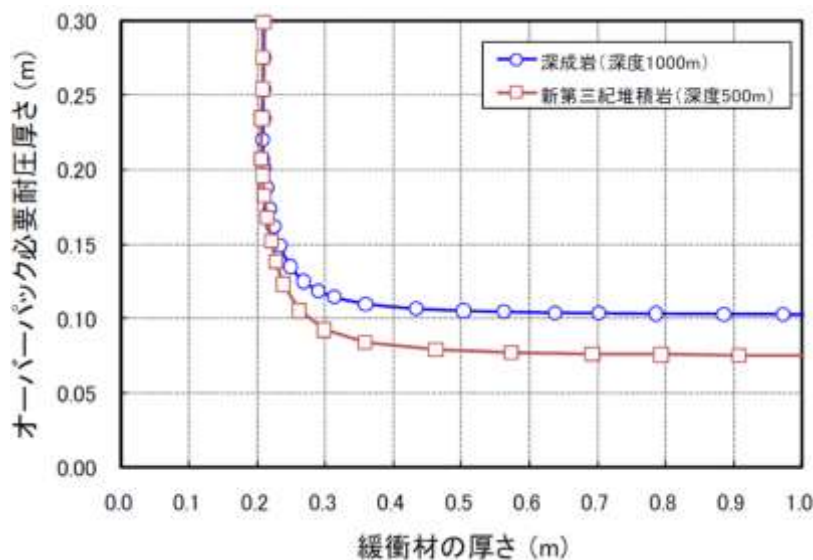


図 6.1.2-7 緩衝材厚さとオーバーパック耐圧厚さの関係  
(NUMO、2016) [3]

操業期間中において緩衝材施工品質に影響を及ぼす要因の一つとして、岩盤の割れ目からの湧水が挙げられる。その湧水による影響のパターンは、緩衝材定置時の緩衝材への滴水による膨潤、および定置後のパイピングによる緩衝材の流出に分けられ、それぞれについて許容時間湧水量が定められている。

### 3) 地下施設の設計

地下施設の設計フローを図 6.1.2-8 に示す。地下施設は、想定される地質環境モデルに基づき設定される設置可能深度を条件として設計される。処分区画形状に関しては、1)で述べた通り、パネル方式およびフィッシュボーン方式が検討されているが、共に多数の処分坑道が並置される計画となっている。



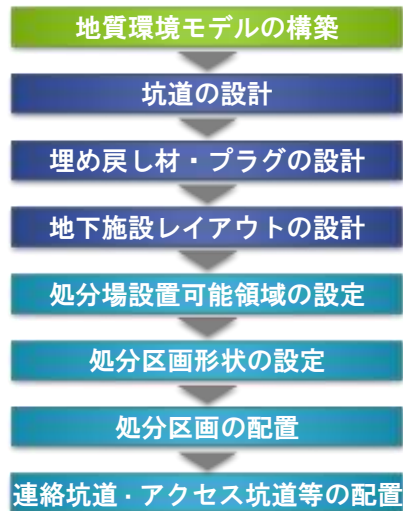


図 6.1.2-8 地下施設の設計フロー  
(NUMO、2016 に基づく) [3]

処分孔の設計に関して、廃棄体の定置方法としては、縦置き方式と横置き方式が想定されている。縦置き方式の場合には、高レベル放射性廃棄物を人工バリアと共に埋設するための処分孔が必要となる。廃棄体は一定の間隔で掘削された処分孔に、人工バリアを施しながら一体ずつ定置される。処分孔の設計にあたっては、人工バリアを設置するのに必要な内空とすること以外に、処分坑道を埋め戻す際に過度の放射線による作業者の被ばくを避けるための対策が考慮される。そこで、人工バリアの上部の放射線を遮蔽し、処分坑道内の空間線量を低減する目的で、緩衝材と同じ材料を一定の厚さに埋め戻す計画としている。以上に基づいて、処分孔の仕様は、内径が 2、220 mm で、深さを 4、150 mm としている。

処分坑道については、設定した建築限界に基づき、断面を決定している。一方で、横置き定置方式の場合には、処分坑道に高レベル放射性廃棄物を人工バリアと共に直接埋設するために、処分孔は必要とせず、主に PEM 容器の寸法から断面が決定される。PEM 容器内オーバーパックの軸方向長さは 1、750 mm、オーバーパックと緩衝材の隙間は 20 mm、PEM 容器鋼殻厚は 28 mm である。図 6.1.2-9 に処分坑道・処分孔内空および支保工の設計例を示す。坑道断面形状は、力学的安定性と経済性、施工性等を鑑みて設定される。ここでは、地下施設設置深度において深成岩および先進第三紀堆積岩は力学的に余裕があることから幌型を基本とし、新第三紀堆積岩は力学的に余裕がないものの経済性にも配慮し、三心円馬蹄形を基本としている。

仕様		深成岩	新第三紀堆積岩
断面図			
ロックボルト	長さ	2.0m	3.0m
	周方向間隔	1.2m	1.0m
	延長方向間隔	1.5m	1.0m
鋼製支保工	仕様・規格	—	H-154×151×8×12 (HT590)
	建込間隔	—	1.0m
吹付けコンクリート		5cm	20cm
二次覆工コンクリート		—	—
離間距離	坑道間	2D (10m)	2.4D (12m)
	処分孔	2d (4.44m)	3d (6.66m)

図 6.1.2-9 処分坑道・処分孔内空と支保仕様の設計例  
(NUMO、2016 に基づく) [3]

次に処分区画形状の設計例を図 6.1.2-10に示す。1)でも述べたとおり、処分区画形状としては、処分パネル型とフィッシュボーン型が検討されている。

深成岩、新第三紀堆積岩モデルに対する高レベル放射性廃棄物の豎置き方式の定置区画は、処分パネル型が想定されている。処分パネル型では、処分坑道の両端が主要坑道と接続する。豎置き方式では、人工バリア・廃棄体の搬送・定置装置を軌道方式としているため、処分坑道と主要坑道の接続部は、曲線となっている。また、坑道との接続部等（坑道交差部）は、隣接する処分坑道のラップ部分ができるだけ少なくなるような交角に設定される。この結果、定置区画の形状は平行四辺形となる。

一方、先新第三紀堆積岩モデルに対する豎置き方式および横置き方式の定置区画の構造は、フィッシュボーン型が想定されている。横置き PEM 方式による操業を豎置き方式と比べると、豎置き方式の場合は、処分孔に廃棄体を定置した後も、上部の処分坑道は通行が可能であり、通路としての利用も考慮して主要坑道を周回させていたのに対して、横置き PEM 方式の場合には、処分坑道奥から順次定置することになり、その後の処分坑道の通り抜けはできなくなるので、主



要坑道を周回させて通路として利用することがない。したがって、横置き PEM 方式では、定置区画の形状に周回する主要坑道を考慮しないフィッシュボーン型を採用することが想定されている。PEM 定置装置は、タイヤ式を想定しており、軌道式に比べて坑道内の走行に関して自由度が高い。すなわち、交差角度を直角となるように、定置装置の最小回転半径などを設定して、その動線の成立性を確認する作業が行われている。このため、横置き PEM 方式では、縦置き方式のように定置区画を平行四辺形で構成する必要はなく、より効率的な形状である長方形が定置区画の基本形状となっている。

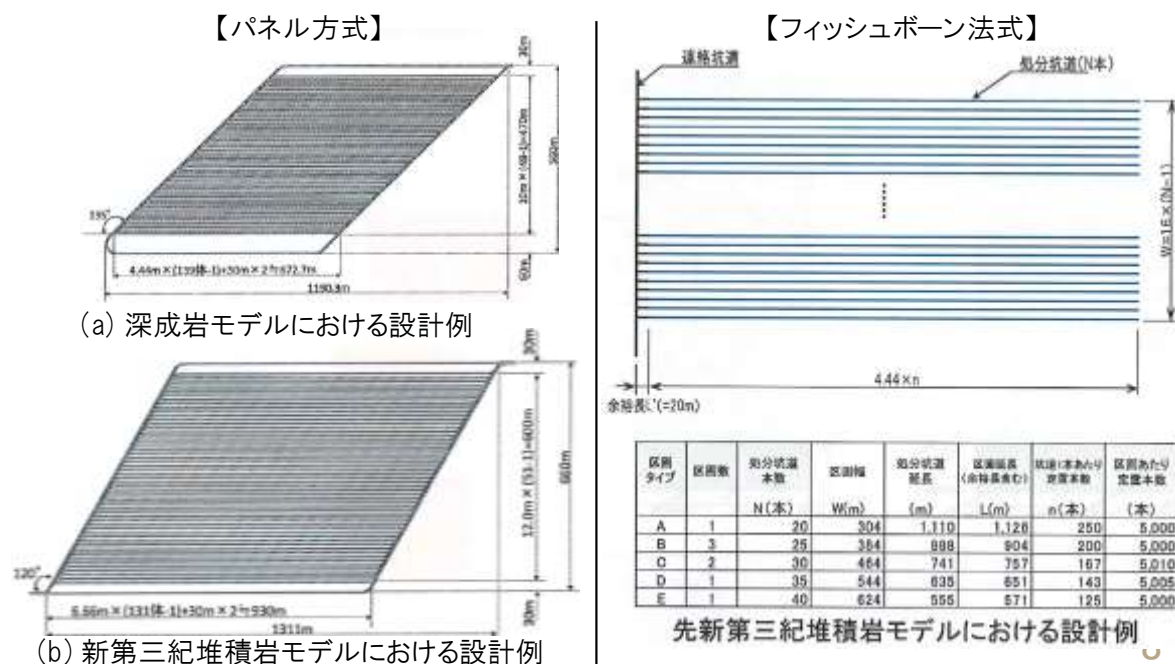


図 6.1.2-10 処分区画形状の設計例  
(NUMO、2016 に基づく) [3]

### (3) 処分場建設および操業の基本的な考え方

#### 1) 縦置き・ブロック方式 (パネル型)

建設 (坑道掘削) は、処分区画単位で実施される。処分坑道は、同一方向に一定の間隔において多数の坑道を接続するため、熱および力学の観点から坑道が相互に影響を与えないよう、適切な離間距離 (以下、処分坑道離間距離という) を設定している。また、縦置き方式においては、処分孔を一定間隔で掘削するが、処分孔も相互に影響を与えないように廃棄体の定置間隔 (以下、処分孔間隔という) が設定されている。3) で述べた処分坑道および処分孔の断面形状に基づいて、空洞安定性の確保と、緩衝材の最高温度が  $100^{\circ}\text{C}$  を超えないような坑道離間距離と処分孔間隔が検討されており、この結果、深成岩モデルの場合、坑道離間距離は  $2D$  (10m)、処分孔間隔は  $2d$  (4.44 m) となり、新第三紀堆積岩モデルでは坑道離間距離は  $2.4D$  (12 m)、処分孔間隔は  $3d$  (6.66 m) となっている。

埋戻しについては、操業期間中においても廃棄体定置が完了した処分坑道から埋め戻すことを想定している。埋め戻し材の機能・役割としては、放射性物質の移行経路となる地下水の流れの

抑制と再冠水後の緩衝材や止水プラグの坑道への膨出の抑制が挙げられる。

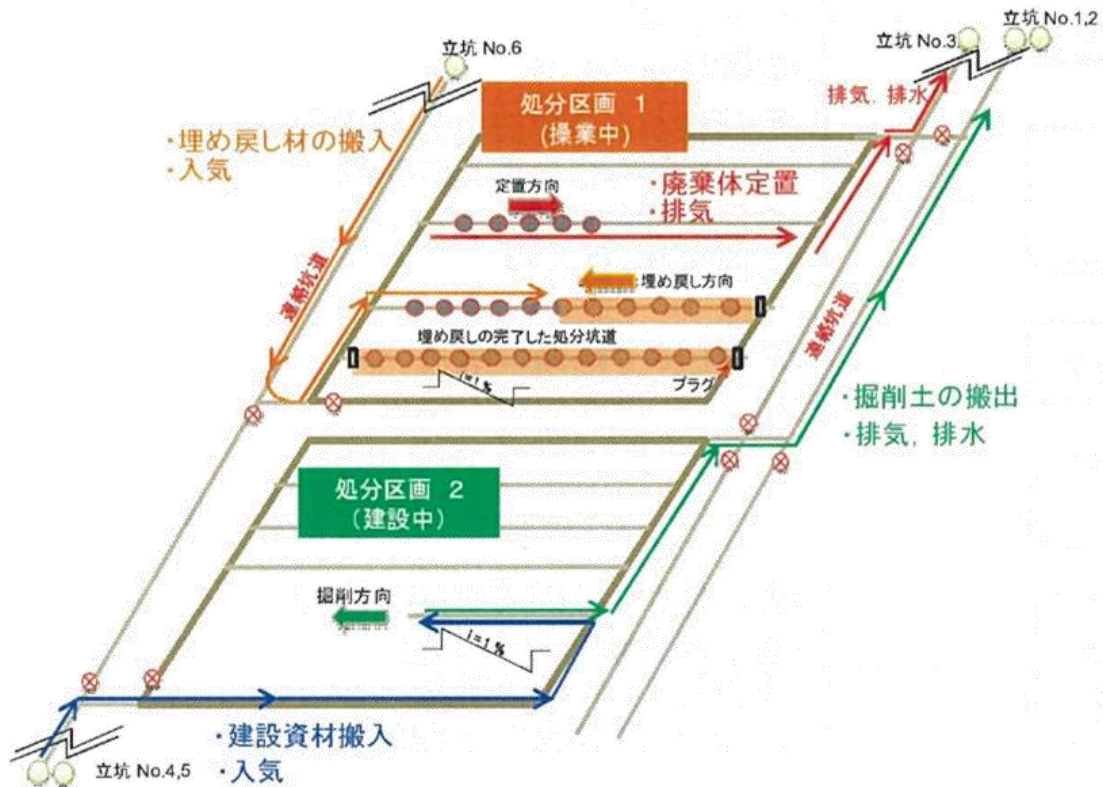


図 6.1.2-11 パネル方式における処分場建設および操作の基本イメージ  
(NUMO、2016) [3]

## 2) 横置き・PEM方式 (フィッシュボーン型)

建設 (坑道掘削) は、縦置き・ブロック方式と同様に、処分区画単位で実施される。横置き PEM 方式の場合には、処分坑道奥から順次定置することを想定しており、廃棄体の定置が完了した時点で、処分坑道が埋め戻されることになり、その後、処分坑道を通路として利用することもない (できない)。処分坑道離間距離は、深成岩モデルで緩衝材制限温度の制約から 2.85D (14 m)、新第三紀堆積岩モデルでは空洞安定性から設定された 2.4D (12 m) とされている。また、廃棄体の設置間隔は PEM 容器長さから決まり、3.36 m とされている。

埋め戻し材の機能・役割としては、放射性物質の移行経路となる地下水の流れの抑制と再冠水後の緩衝材や止水プラグの坑道への膨出の抑制が挙げられる。

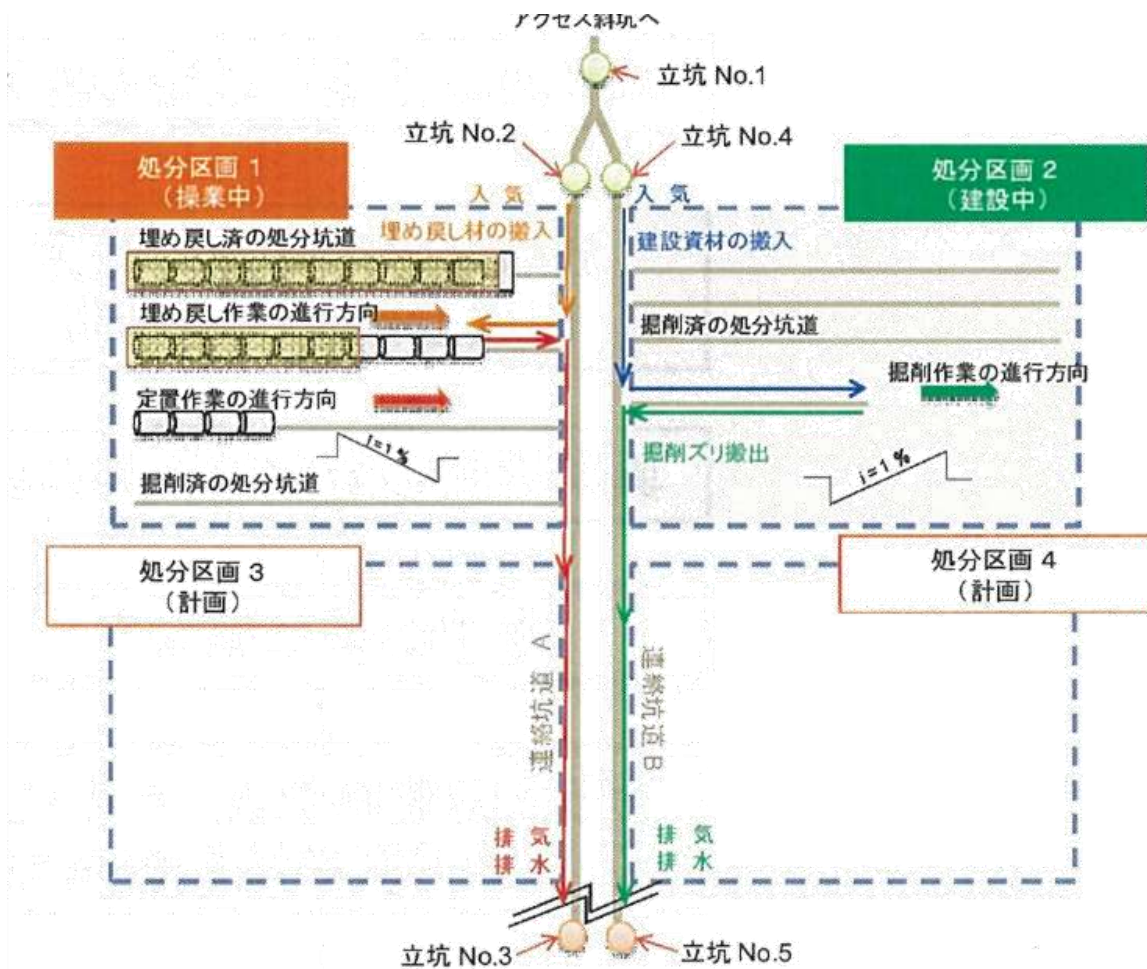
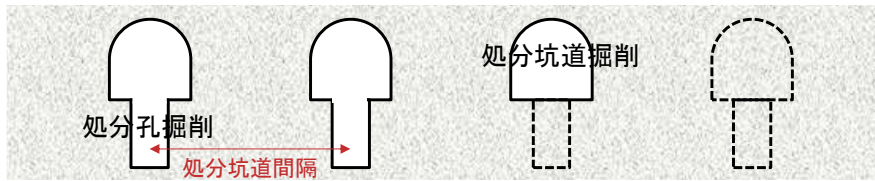


図 6.1.2-12 フィッシュボーン方式における処分場建設および操業の基本イメージ  
(NUMO、2016に基づく) [3]

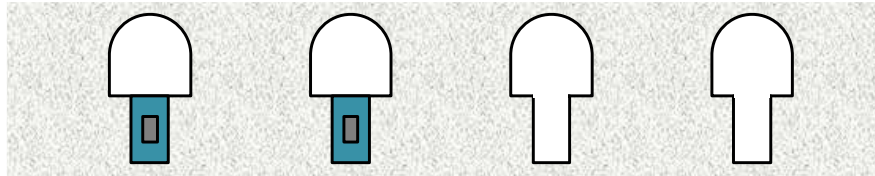
(4) 掘削～定置～埋戻しの施工順序

図 6.1.2-13 に、縦置き方式採用時の処分場建設から操業時における施工順序のイメージを示す。処分坑道および処分孔の掘削は処分区画ごとに行われる。処分区画における掘削が一通り完了した後、処分坑道ごとに廃棄体の定置が行われる。そして、廃棄体の定置が完了した処分坑道について順次埋戻しの作業が行われる。この際、掘削作業方向、廃棄体の定置方向と埋戻しの方向は反対となる。施工順序は、隣接する処分孔の湧水挙動に影響することから、縦断・横断方向での施工の進展に伴う湧水挙動の評価が必要である。

- 掘削は、処分区画ごとに実施



- 定置は、処分坑道ごとに実施



- 埋戻しは、定置が完了した処分坑道で実施

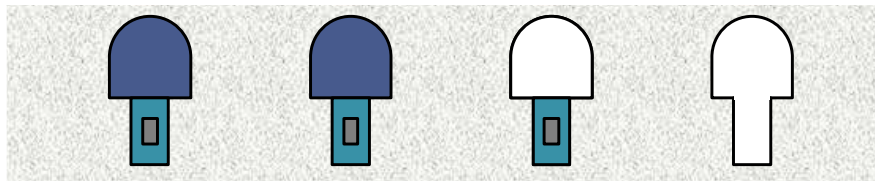


図 6.1.2-13 処分場建設から作業時における施工順序のイメージ

#### (5) 作業期間中に緩衝材品質に与える湧水の影響

##### 1) 定置時における許容時間湧水量

定置時における許容時間湧水量は、堅置き方式では湧水対策として想定されている湧水貯留槽（図 6.1.2-14 参照）の容量により規定される。湧水貯留層は、処分孔内へ湧水が流入した場合の排水対策として処分孔底部に設けることが想定されており、マット材、砂利および粗ケイ砂などが利用可能と考えられている。湧水貯留層を設けた場合の条件は、表 6.1.2-3 の通りである。処分孔の深さは一定で、厚さ分だけ上部緩衝材の厚さを減ずることになる。また、上部緩衝材の厚さは、放射線遮蔽性の再評価（原環センター、2006）[7]によると 50 cm 程度まで低減することが可能であるため、湧水貯留層の厚さを 0~50 cm とする。湧水貯留層の空隙率については、球の六方最密充填構造が想定されて設計に必要な計算が行われている。さらに、廃棄体 1 体を定置するのに要する時間は、仮の作業時間として 8 時間を見込んでいる。以上の条件設定から、まず、湧水貯留層への貯留量  $V$  が次式で与えられる。

$$V = d \times \pi \left( \frac{R}{2} \right)^2 \times \varepsilon$$

そして、次式に示す通り、貯留量  $V$  を施工時間  $t$  で除すことで、許容時間湧水量  $\phi$  (m<sup>3</sup>/min) が与えられる。

$$\phi \leq \frac{V}{t}$$

許容時間湧水量は貯留層の厚さを増加させること、また施工時間を短縮することにより増加させることも可能である。NUMO[3]では、暫定的に湧水貯留層の厚さを 0.3 m として定置率を検討



しており、この場合、許容時間湧水量は 0.63 L/min と試算されている。

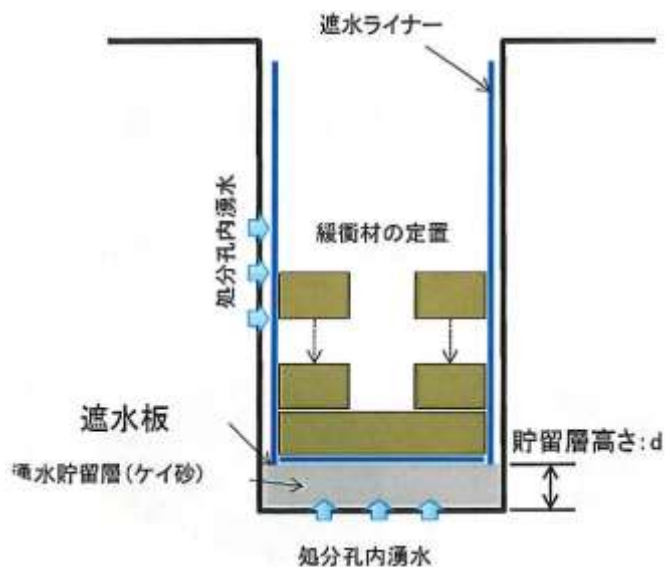


図 6.1.2-14 処分孔湧水対策の例  
(NUMO、2016 に基づく) [3]

表 6.1.2-3 湧水貯留槽の設定  
(NUMO、2016 に基づく) [3]

パラメータ	設定値
処分孔直径 R	2.22 m
湧水貯留層の厚さ d	0-0.5 m
湧水貯留層の空隙率 $\epsilon$	26% (球の六方最密充填構造を想定)
廃棄体 1 体を定置する のに要する時間 t	480 分

## 2) 定置後における許容時間湧水量

定置後における許容湧水量は、パイピングによる緩衝材の流出量により規定される。パイピングとは岩盤の割れ目から地下水が処分孔に流れ込み、緩衝材／孔壁の界面にみずみちを形成する現象のことを言い、閉鎖後長期にわたる隙間の残存、密度の低下が懸念されている。パイピングによる緩衝材の流出量は、図 6.1.2-15 に示すように緩衝材を通過した水の流量が増加するほど大きくなる。

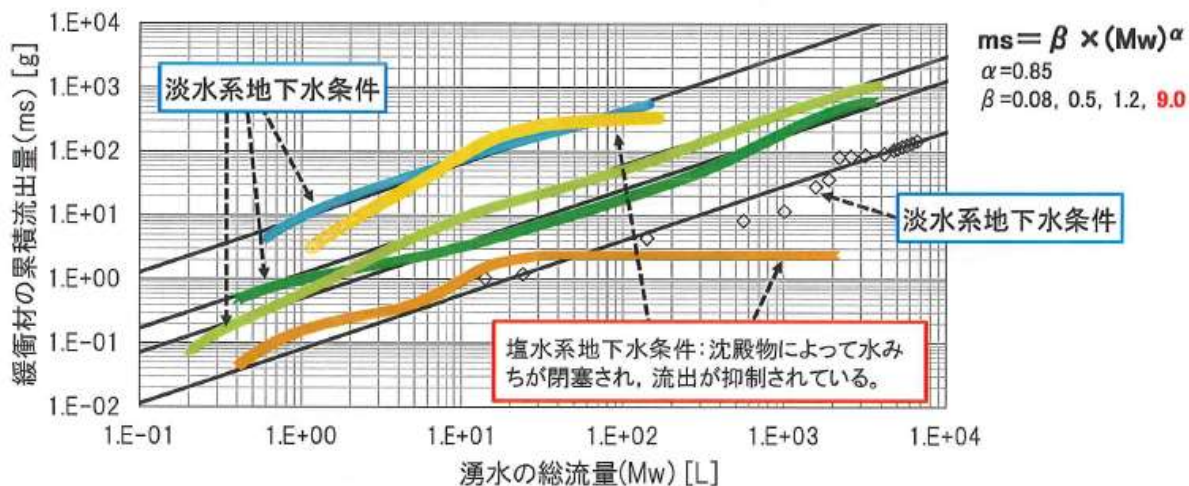


図 6.1.2-15 総流量と緩衝材流出量の関係  
(原環センター、2015 に基づく) [8]

降水系地下水条件における緩衝材の流出量は、図 6.1.2-15 にも示すように、以下の式で近似することが出来る。

$$ms = \alpha \div (Mw)^\beta$$

ここで、 $ms$  は流出量 (g)、 $Mw$  は総流量 (L)、 $\alpha$  および  $\beta$  は任意の定数である。許容時間流出量は、局所的に緩衝材が流出したとしても、膨潤によって隙間を閉塞する緩衝材が残存していること、および、局所的な領域で必要な密度が確保されていることが必要とされる。そのため、緩衝材の安全機能が損なわれない、流出量の限界値（以下、許容流出量という）に対応する湧水量とすることが品質を確保する上で重要となる。NUMO では、緩衝材の設計要件をすべて確保するために許容できる条件として、流出量を 1.3Mg に設定した。また、深成岩・新第三紀堆積岩・先進第三紀堆積岩での処分場でのパイピングの評価期間（廃棄体定置後から上部の処分坑道が埋め戻されるまでの期間）はそれぞれ 299 日・285 日・501 日と設定した。そして、この設定値に基づいて定置率の検討で使用するパイピングを回避するための基準値を算定した結果、深成岩で 2.8 L/min、新第三紀堆積岩で 3.0L/min、先進第三紀堆積岩で 1.7L/min となった。

## (6) 工学的湧水対策

### 1) グラウトによる湧水量低減

掘削時に湧水が生じ、定置時の緩衝材の施工品質や、定置後のパイピング等による緩衝材の流出への影響が懸念される場合には、湧水量を低減させる対策が必要である。その手法の一つとしてグラウトによる湧水量低減対策が考えられる。透水性の割れ目に対してモルタルや薬液などのグラウトを注入し充填させることで、割れ目からの湧水量を低下させる効果がある。グラウトの改良評価値としては、一般的にルジオン値 (Lu) と呼ばれる透水性を表す指標が用いられ、所定のルジオン値になるまで注入を行う。1Lu は 1MPa の水圧をかけて、ボーリング孔 1m あたり、一分間に地盤に浸透する水の量を示す。図 6.1.2-16 にグラウトによる湧水低減対策のイメージを示す。グラウトには、削孔を行う前に透水性を下げるプレグラウトと、削孔後にパッカーを用い

て行うポストグラウトがある。ポストグラウトの施工方法として、区間湧水量の多い箇所に適用する Mega-Packer システム (図 6.1.2-17) などが海外において検討されている。

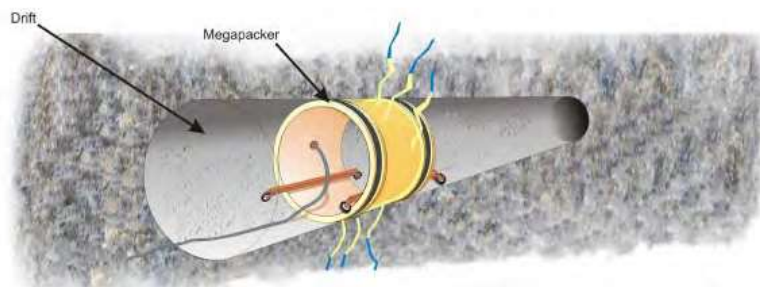
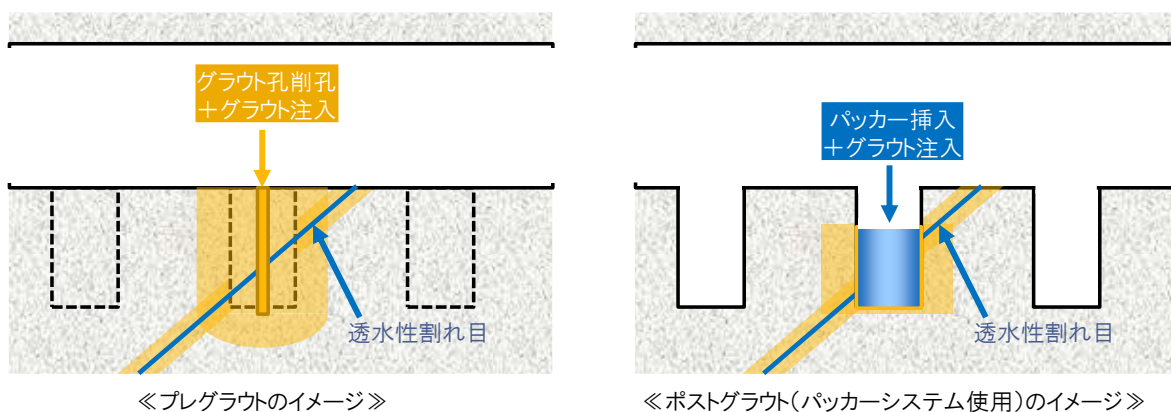


図 6.1.2-17 メガパッカーを用いたポストグラウトのイメージ  
(Patterson, 2007) [9]



図 6.1.2-18 ポストグラウト状況  
(Eriksson, 2015) [10]

## 2) 予備区画の設定

掘削時に湧水が生じ施工への影響が懸念される場合には、その領域は廃棄体の定置に適さないと判断し、予備的に別途処分孔を設ける考え方があ。処分孔の利用の可否は、堅置き方式の場合、処分坑道の掘削の可否と(5)で求められた許容時間湧水量を指標として判断される。処分孔掘削の可否に対する許容時間湧水量は、既往のトンネル掘削の実績に基づいて 300L/min/m とされている。また緩衝材の施工に対する許容時間湧水量とパイピングに対する許容時間湧水量と比較すると、条件としては前者がより低い値となるため、作業期間中の湧水影響に対する許容時間湧水条件は、1)を参考として、例えば 0.63 L/min と言った数値が目安となる。堅置き方式の定置率は上記二つの基準から求められる利用率の積から求めることができる。

処分坑道の利用率について、300L/min/m を超える処分孔を適さないとみなした場合、深成岩の場合は 99.9%、新第三紀堆積岩の場合は 100%の処分孔への定置が可能である。一方、作業期間中の許容時間湧水量である 0.63L/分以下を基準として考えると、深成岩の場合は 76.2%、新第三紀堆積岩の場合は 100%、先新第三紀堆積岩の場合は 92.1%となる。したがって廃棄体定置率はそれぞれ 76.2%、100%、92.1%となる (図 6.1.2-19 参照)。



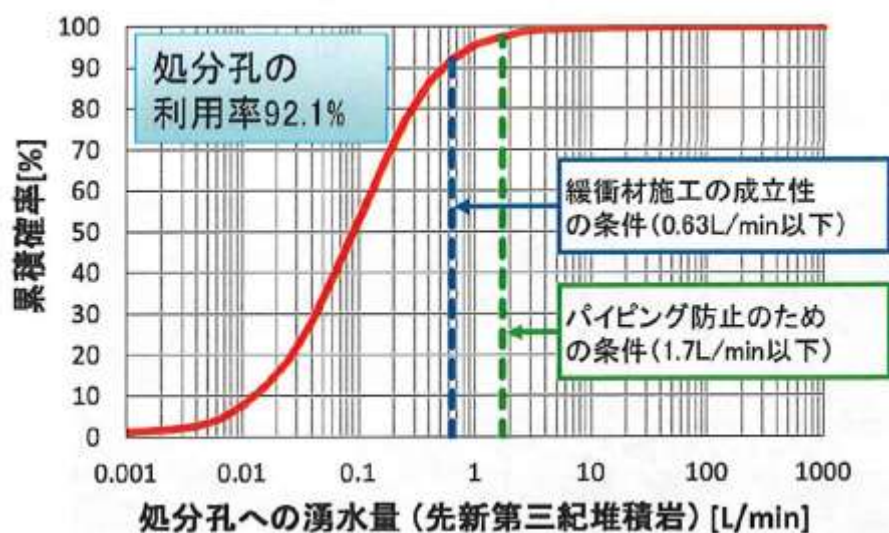
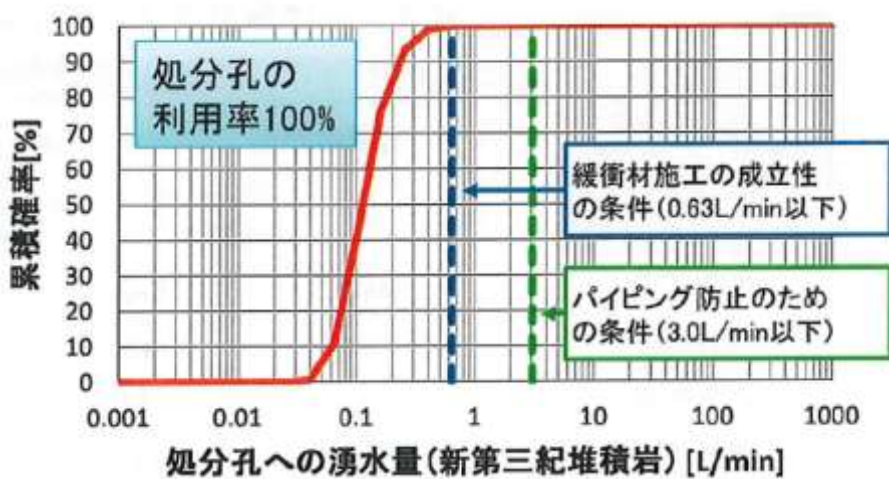
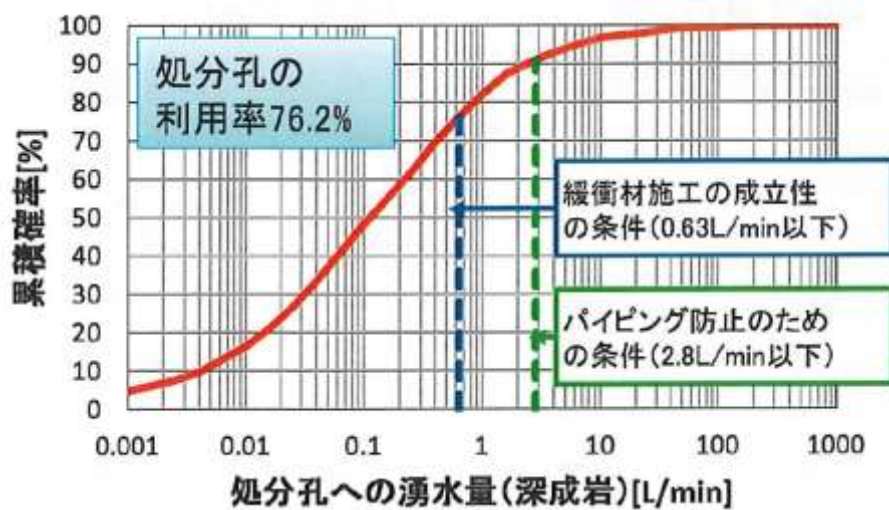


図 6.1.2-19 候補母岩における処分孔湧水量の試算結果  
(NUMO、2016に基づく) [3]

以上の考え方で算出した廃棄体定置率に基づき、予備的な処分孔を別途設けることで、湧水により施工が困難な事象にも対処することが可能となる。例えば、深成岩縦置き方式の場合には定置率は 76.2%と想定されており、処分孔の不良率は 23.8%となる。定置する総廃棄体（ガラス固化体）数は 40、000 本と計画されており、廃棄体で約 9、500 本相当を定置可能な予備区画が必要となる。深成岩縦置き方式における廃棄体 1 本あたりの専有面積は 44.4m<sup>2</sup>（＝処分孔間隔：4.44m×処分坑道離間距離：10m）であり、予備区画としては、最低で約 430、000m<sup>2</sup>の廃棄体定置領域が必要となる（実際には、これに連絡坑道を加えて計画するため、その分の領域を追加で確保する必要がある）。深成岩モデルでの予備区画の検討例を図 6.1.2-20 に示す。同一平面内に予備区画を配置することが難しい場合には、異なる深度に定置区画を建設する方法も考えられ、定置区画を多層化する場合の設計オプションも検討されている。処分孔内の湧水量が多く、定置に適さない処分孔が多い場合には、多段配置なども検討することによって予備区画を設け、地質環境に柔軟に対応することで対処することが可能とされている。

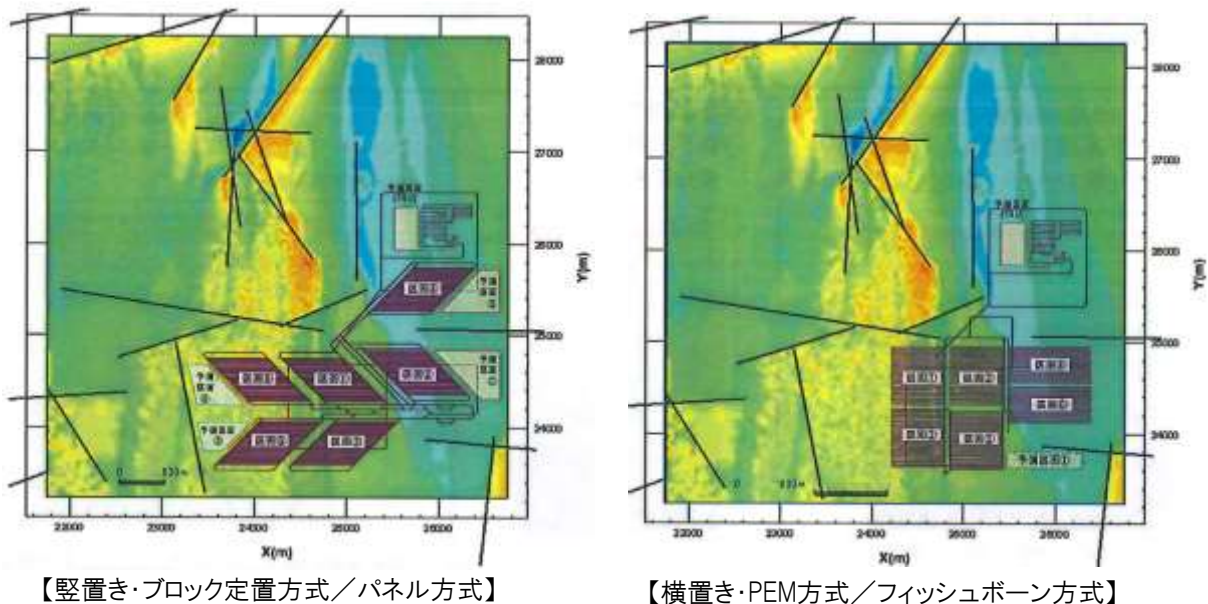


図 6.1.2-20 深成岩モデルでの予備区画の検討例

(NUMO、2016 に基づく) [3]

#### (7) 坑道掘削・定置・埋戻しの順序の整理結果のまとめ

##### 1) 湧水の影響要因の整理

本章では、NUMO より得られる情報等を参考に、操業期間中において緩衝材の品質に影響を与える湧水に関する情報を整理した。緩衝材の品質に関する情報や、その前提となる設計オプションおよび地下施設的设计条件等の各種情報もとりまとめ、横置き・PEM方式については、緩衝材が PEM 容器に収納されている点から湧水による影響を受けにくいこと、一方の縦置き・ブロック方式については、定置時および定置後について湧水による緩衝材の流出が懸念されることなど、定置方式別に重要となるポイントを抽出した。

また、緩衝材の品質に影響を与える湧水量の定量的な評価に係る既往の検討を参考に、許容湧

水量の設定方法や試算結果に関する情報を整理した。具体的な試算方法として、定置時における許容時間湧水量については、堅置き方式で湧水対策として想定されている湧水貯留槽の厚さを仮に 0.3 m とした場合、許容時間湧水量は 0.63 L/min となることを示した。また、定置後における許容湧水量については、パイピングによる緩衝材の流出量により規定することができ、パイピングを回避するための基準値が深成岩で 2.8L/min、新第三紀堆積岩で 3.0L/min となることの数的根拠を示した。

さらに、掘削時に湧水が生じ施工状況への影響が懸念される場合の対策として、その領域の処分孔への定置は適さないと判断し、予備的な処分孔を別途設ける考え方を示した。処分孔の利用の可否は、堅置き方式の場合、処分坑道の掘削の可否と許容時間湧水量を指標として判断され、仮に操業期間中の許容時間湧水量である 0.63L/分以下を基準として考えると、定置率は深成岩の場合で 76.2%、新第三紀堆積岩の場合で 100%、先新第三紀堆積岩の場合で 92.1%となることを示した。この予備区画の検討は、一定の基準を超える処分孔に対して一律に適用されており、例えば、基準を僅かに超過する箇所等への段階的な措置は考慮されていない。その段階的な措置を講ずるうえで、グラウトは予備区画を設定するよりも合理的の選択肢となり得る可能性があることから、工学的止水対策としての適用が期待される。

最後に、掘削～定置～埋戻しの施工順序について、既往の検討資料では、具体的な施工順序を含む個別の建設技術や操業技術に関する記述は少ないのが現状である。ただし、堅置き方式採用時の処分場建設から操業時における施工順序のイメージから、以下のことが読み取れる。

- ・ 処分坑道および処分孔の掘削は処分区画ごとに行われる。
- ・ 処分区画における掘削が一通り完了した後、処分坑道ごとに廃棄体の定置が行われる。
- ・ 廃棄体の定置が完了した処分坑道について順次埋戻しの作業が行われる。

処分孔湧水に与える施工順序の検討にあたっては、これらの基本事項を考慮する必要がある。

## 2) 対象とする水理モデルに関する考察

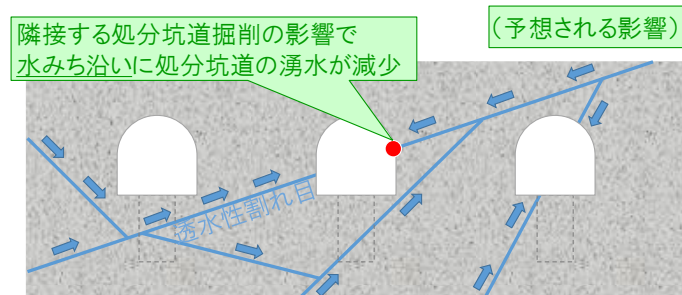
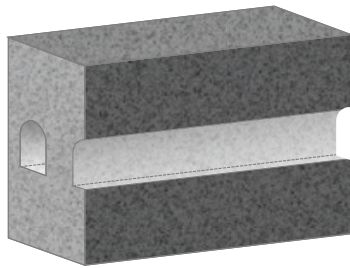
本検討では、操業期間中において湧水の影響が懸念される堅置き方式の優先度が高いと判断し、解析的な検討を進めることとした。また地質については、地層処分の候補母岩の一つであり幌延 URL で検討が進められている新第三紀堆積岩を対象とした。

昨年度（平成 27 年度）までの研究において、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いて、「割れ目ネットワークモデル」を用いた浸透流解析から処分坑道の湧水量を算出し、解析的検討手法の有効性を示した。しかしながら、解析モデル内に設定した処分坑道は 1 本であり、施工ステップも坑道掘削、処分坑道掘削およびグラウトによる止水対策の 3 つの段階だけであった。本章の検討において、隣接する処分坑道や処分孔の施工段階が湧水挙動に影響することが示されたことから、これらの施工条件を踏まえたより現実に近い形での解析的検討が必要である。

そこで、処分場パネルを想定した施工の進展に伴う湧水量変化について評価を行う。具体的には、単一の処分坑道モデルから処分場パネルへと検討範囲を拡大し、複数の処分坑道を設定した「割れ目ネットワークモデル」を構築した。そして、新たに構築したモデルを用いて浸透流解析を行い、周辺の処分坑道が処分孔の湧水量に与える影響を評価した。これによって、実際の処分パネルに近い水理場を設定し、その上で、グラウト施工手順が処分孔の湧水量に与える影響につ

いての検討を行うものとした。さらに、緩衝材定置後の処分孔の湧水量への影響検討についても予察的な検討を行った。

### STEP1: 処分坑道掘削



### STEP2: 処分孔掘削

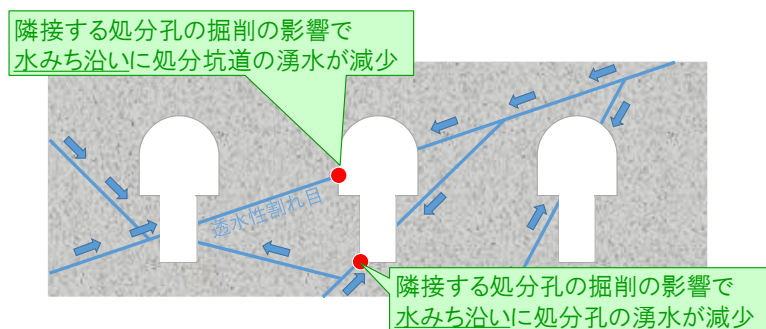
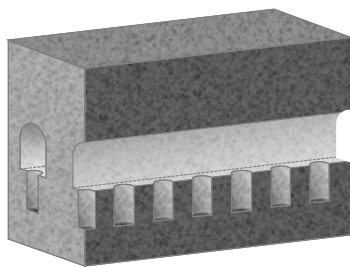


図 6.1.2-21 複数の処分坑道をモデル化した場合に予想される湧水量変化

## 6.1.3 複数の処分坑道が処分孔の湧水に与える影響評価

### (1) 検討方針

平成 27 年度の検討において作成した 3 次元水理地質構造モデルを基本として、新たに複数の処分坑道を取り込んだ水理地質構造モデルを構築し、定常の浸透流解析を実施して処分坑道への湧水量を算定した。処分坑道数は 5 本を基本としたが、比較のため、処分坑道数 3 本の水理地質構造モデルを追加で作成し、同様に浸透流解析を実施して処分坑道への湧水量を算定した。平成 27 年度実施した処分坑道 1 本の場合の解析結果も併せて、処分坑道数の違いによる解析結果の比較を行い、境界条件の妥当性の検証と湧水量の評価方法についても検討した。

検討は以下の手順で行った。

- ① 複数の処分坑道を考慮した水理地質構造モデルの構築
- ② 浸透流解析による処分坑道への湧水量の算定
- ③ 処分坑道数の違いによる湧水量の比較および湧水量評価方法の検討
- ④ 複数坑道モデルの選定と、処分坑道および処分孔の湧水量の評価

本検討において構築する複数処分坑道モデルの概要を図 6.1.3-1 に示す。処分坑道は 6.1.2 の検討に基づき直径 5m の円筒空洞とし、処分坑道間隔は 12m とした。



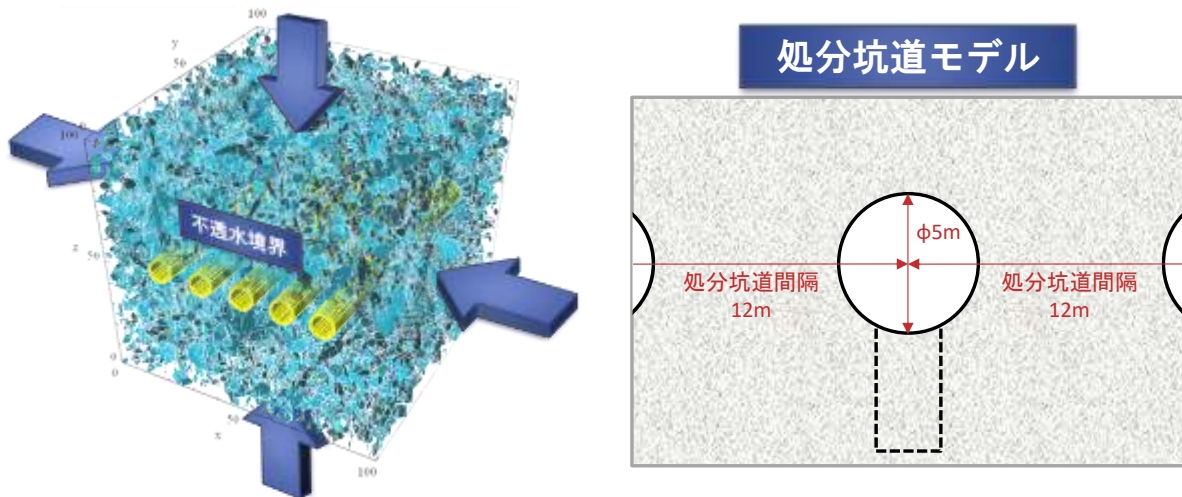


図 6.1.3-1 複数坑道モデルの概要

## (2) 水理地質構造モデルの構築

### 1) 割れ目ネットワークのモデル化

幌延の 350m 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 : 50.62 m) と東連絡坑道 (N30W 方向 : 55.95m) で得られたデータを利用することによって、観察方向の偏りを抑えた整理を行い、両連絡坑道の調査データに基づいて幾何学的パラメータセットを設定した。記載された割れ目のうち、掘削に伴う応力開放により形成されたと考えられる「ゆるみ割れ目」を除く割れ目は西連絡坑道で 428 本、東連絡坑道で 520 本であった。両連絡坑道を合わせると 928 本となり、統計量を推定するにあたり、十分な情報量と判断した。これらのデータに基づいて導出した割れ目の幾何学的パラメータセットを表 6.1.3-1 に示す。

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 6.1.3-1 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 6.1.3-1 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[11]を参考にした平成 26 年度の検討成果に基づいて、べき乗数分布を 3.5、最小半径を 3.82m と設定した。

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。

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。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 6.1.3-1 に併記した。

表 6.1.3-1 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 <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	P32adj (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
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

## 2) 処分坑道、掘削影響領域のモデル化

1)で構築した水理地質構造モデル領域内に、処分坑道 5 本を設定した。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。処分坑道の寸法やレイアウトは、「核燃料サイクル開発機構(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第 2 次取りまとめ」[ 15 ]における IV-209、図 4.2.2-2 に示す軟岩系岩盤の処分坑道断面形状に基づく平成 27 年度と検討成果から設定した。具体的には、処分坑道は処分坑道レイアウトを参照して、直径 5m の円形空洞とした（図 6.1.3-2）。そして、坑道は、100m 立方の解析領域の中央に X 軸方向（東西方向）に設置し、並行する坑道を 12m 間隔で設置した。

なお、坑道周辺の EDZ の幅については、日本原子力研究開発機構の調査データ[ 13 ][ 14 ]に基づく H27 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（図 6.1.3-2）。

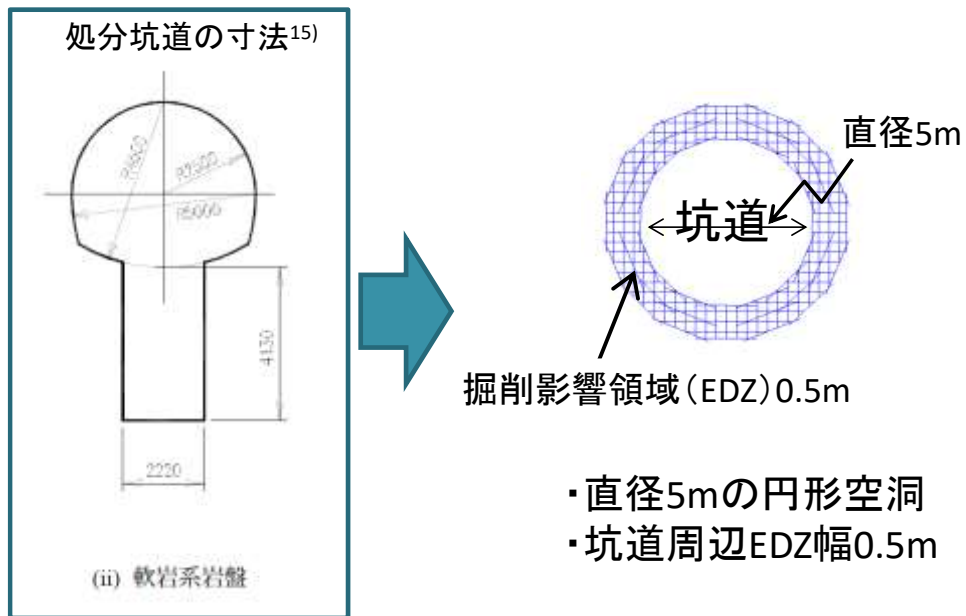
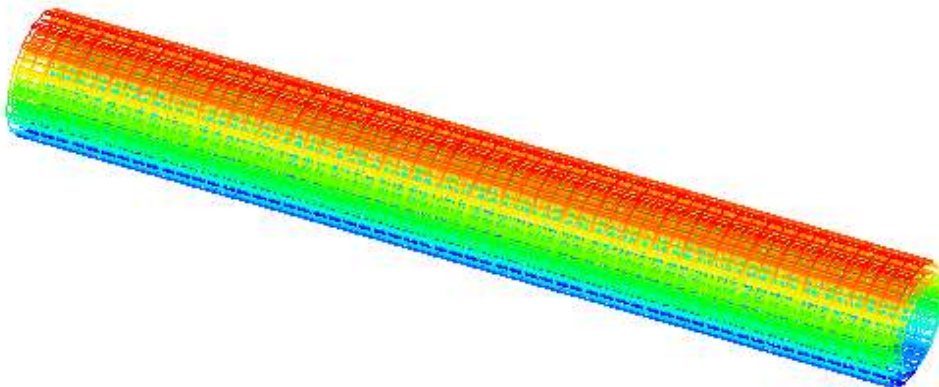


図 6.1.3-2 処分坑道及び掘削影響領域 (EDZ) の設定

EDZ は、図 6.1.3-3 に示すように、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。このモデル化により軸方向の異方性の設定を容易にすることが可能になる。図 6.1.3-4 には割れ目ネットワーク内に EDZ を含む坑道をモデル化したイメージを示す。



(モデルを構成するパイプの色はZ座標を示す)

図 6.1.3-3 EDZ のモデル化



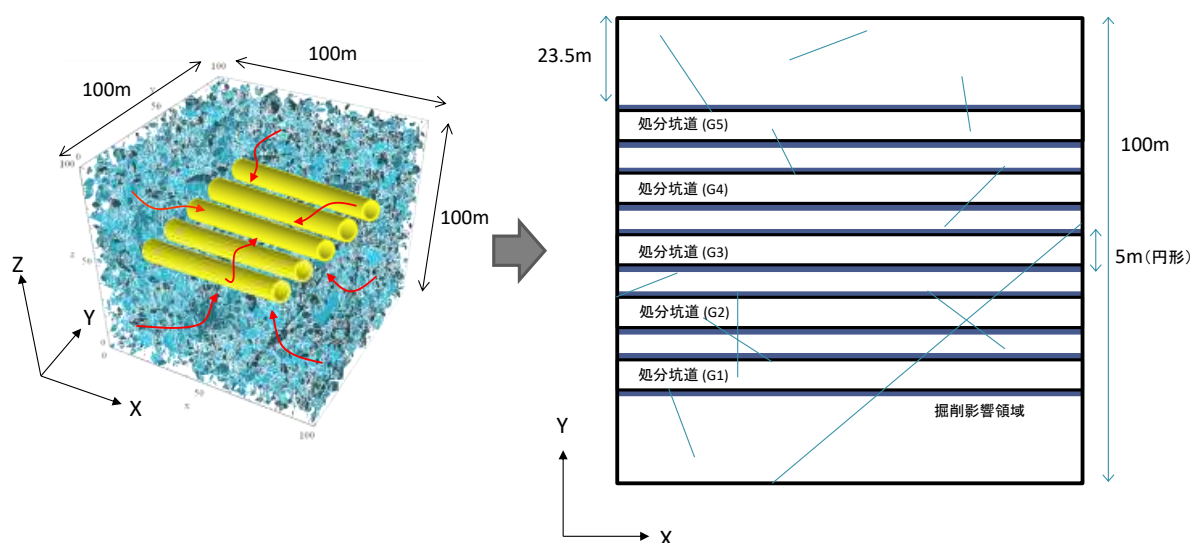


図 6.1.3-4 割れ目ネットワーク内への EDZ のモデル化

### 3) 透水性の設定

透水性の設定方法は、H27 年度における設定条件と同条件である。以下に、対象とする岩盤に含まれる割れ目のうち水みちとして分布している透水性割れ目の割合、割れ目を含む区間の透水係数、基質部の透水係数、EDZ の透水係数の設定条件を記述する。

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、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。

透水係数に関しては、幌延の 350m 坑道で実施された水理試験のデータは少ないため、H26 年度、H27 年度と同様に、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、全体を網羅することを目的として実施された No.1、No.5、No.6、No.7 の 4 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 No.11、No.12 の 2 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 [ 13 ] [ 14 ] 中の記述に基づき、 **$1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$**  と設定した。

以上のパラメータ設定値を水理モデル作成に必要なデータとして、表 6.1.3-2 に整理した。

表 6.1.3-2 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	$1.0 \times 10^{-6} \text{ (m/s)}$

#### 4) 境界条件の設定

平成 27 年度の検討において、日本原子力研究開発機構の調査データ[ 13 ]に基づき、解析モデル境界部の境界条件を、深度相当の水圧 (350m 水頭) に固定した。本年度は、昨年度の解析結果との比較を行うため、解析領域の境界条件については、昨年度と同様に深度相当の水圧 (350m 水頭) を与えた。

### (3) 処分坑道掘削後の湧水量についての検討

#### 1) 検討内容

処分坑道掘削後 (処分孔掘削前) の湧水挙動を再現するため、(2)で構築した 10 リアライゼーション分の水理地質構造モデルを用いて、処分坑道内部の全水頭をゼロに設定した定常の浸透流解析 (図 6.1.3-5 参照) を実施し、処分坑道湧水量を算定した。

平成 27 年度の検討では、処分坑道数 1 本のモデルでの坑道掘削時の湧水量を算定した。本年度は、複数坑道が坑道湧水量に与える影響を評価するために、処分坑道数 5 本の場合について算定した。また、比較のため、処分坑道数 3 本のケースについても同様に算定を行った。以下では、異なる処分坑道数の解析結果を比較し、複数坑道モデルの境界条件の影響等を実評価した。

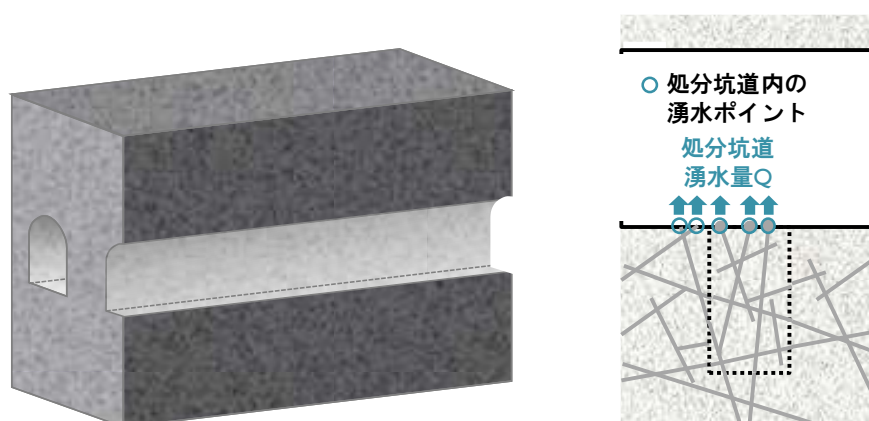


図 6.1.3-5 処分坑道掘削後の解析モデルの模式図

#### 2) 解析結果 (湧水量データ)

処分坑道掘削に伴い発生する処分坑道湧水量を、処分坑道数の異なるモデルごとに 10 リアライゼーションずつ解析した結果を表 6.1.3-3 および図 6.1.3-6 にまとめた。

表 6.1.3-3 処分坑道湧水量の算定結果

モデル No.	坑道数1本モデル [H27検討]	坑道数3本モデル(T)				坑道数5本モデル(P)					
	初期坑道湧水量(L/m in)	初期坑道湧水量(L/m in)				初期坑道湧水量(L/m in)					
	合計 G3:±0m	G2 (-12m)	G3 (±0m)	G4 (+12m)	合計	G1 (-24m)	G2 (-12m)	G3 (±0m)	G4 (+12m)	G5 (+24m)	合計
HR01	7.10	2.58	3.60	6.69	12.87	0.03	2.49	3.43	4.49	6.02	16.46
HR02	10.35	1.80	4.82	14.51	21.13	0.98	1.38	4.52	8.14	27.83	42.86
HR03	2.84	0.67	1.17	5.96	7.80	0.65	0.56	1.05	4.11	4.09	10.45
HR04	3.76	2.58	1.41	1.66	5.65	1.43	1.63	1.06	1.11	3.70	8.93
HR05	3.20	7.39	2.08	0.30	9.77	15.57	6.04	1.74	0.09	7.89	31.33
HR06	8.15	5.17	5.48	2.59	13.24	5.36	3.60	4.63	0.61	14.25	28.46
HR07	10.78	3.83	7.58	5.50	16.91	5.84	1.95	7.37	4.08	5.78	25.02
HR08	48.25	6.50	31.16	24.28	61.93	2.50	4.91	30.77	20.51	11.65	70.34
HR09	2.06	32.49	1.13	1.08	34.69	117.60	24.44	1.01	0.77	6.79	150.61
HR10	10.77	4.60	7.42	3.01	15.03	9.93	2.50	6.83	1.69	3.74	24.67
算術平均	10.73	6.76	6.58	6.56	19.90	15.99	4.95	6.24	4.56	9.17	40.91

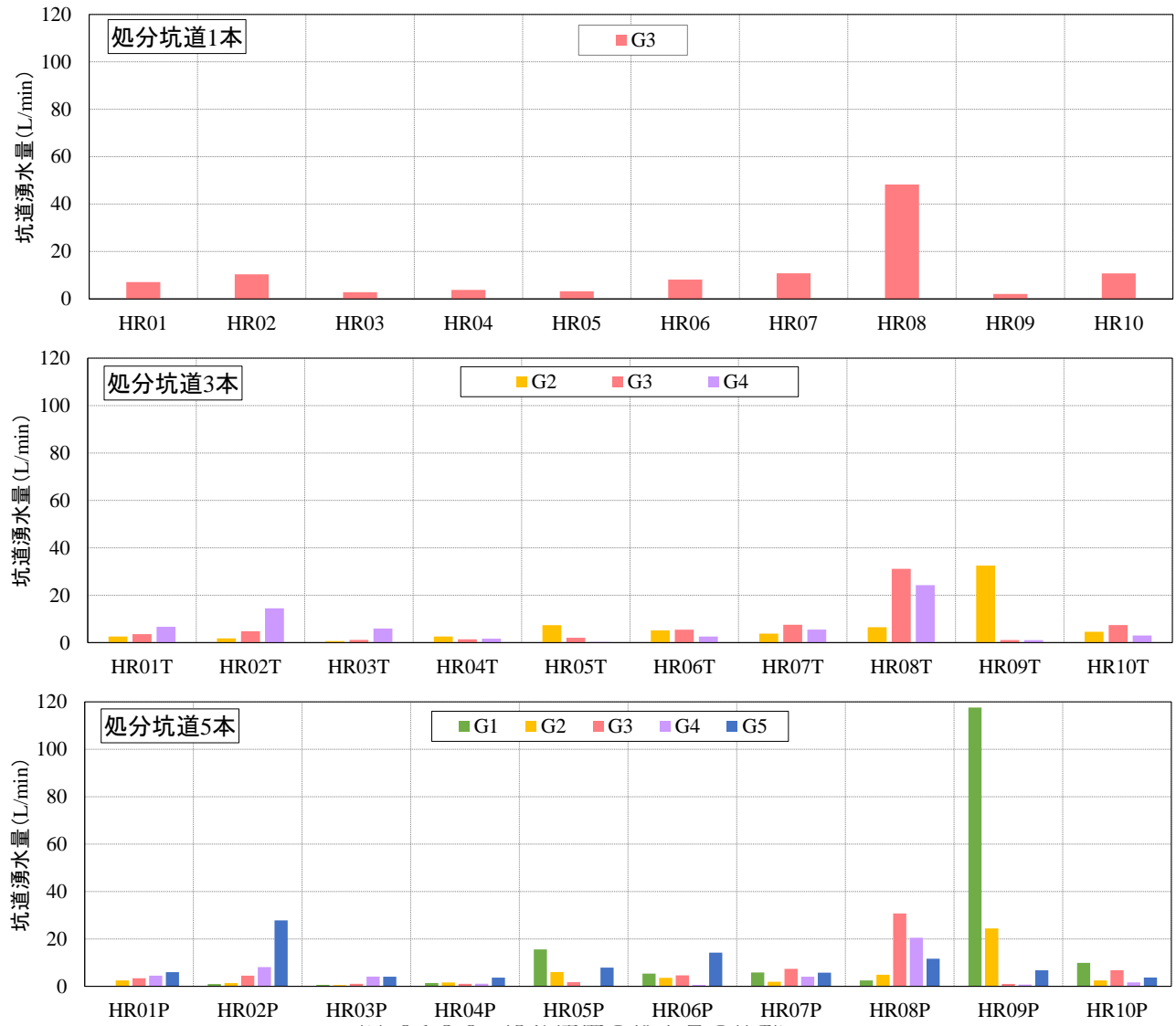


図 6.1.3-6 処分坑道の湧水量の比較

### 3) 処分坑道数と湧水量の関係についての考察

まず、処分坑道掘削後の全処分坑道の合計湧水量を図 6.1.3-7 に示す。図中の赤い線は各リアライゼーションの算術平均を示している。合計湧水量はリアライゼーション毎にばらついており、坑道数 1 本モデルで 2.06L/min から 48.25L/min、坑道数 3 本モデルで 5.65L/min から 61.93L/min、坑道数 5 本モデルで 8.93L/min から 150.61L/min であった。また、算術平均はそれぞれ 10.73L/min、19.90L/min、40.91L/min と、処分坑道数の増加に伴い湧水量が増加している。一方で、中央の処分坑道 1 本当たりの湧水量は、それぞれ 10.73L/min、6.63L/min、6.60L/min と減少しており（図 6.1.3-8 参照）、これらは、処分坑道数の増加に伴い湧水の流出域が拡大・分散していることが要因として挙げられる。一方で処分坑道数の増加に伴い坑道 1 本当たりの湧水量が増加しているケース（例えば HR09）も確認される。これは、湧水量の極端に大きな割れ目が新たにモデル化した処分坑道に交差した影響と考えられる（図 6.1.3-9 参照）。

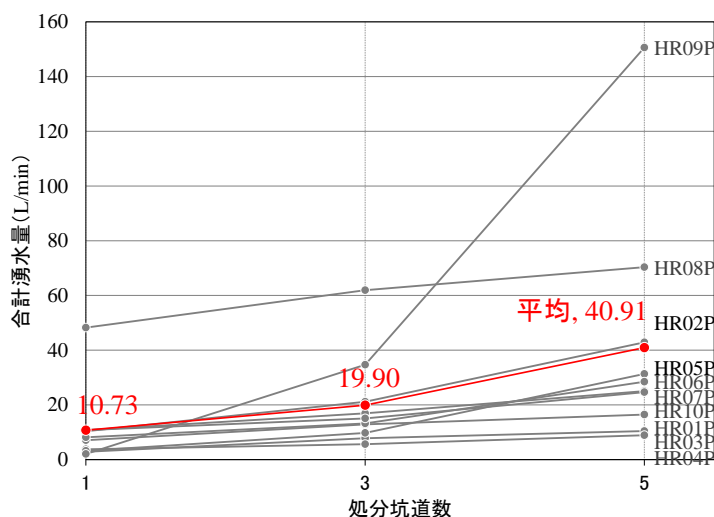


図 6.1.3-7 処分坑道掘削後の全処分坑道の合計湧水量の比較

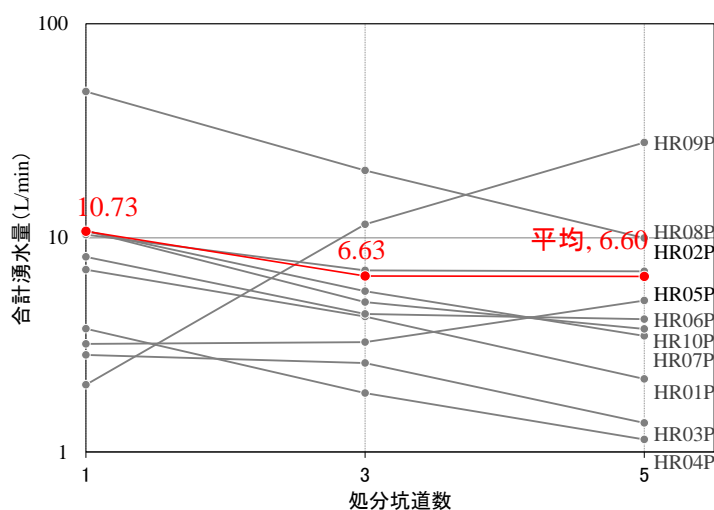
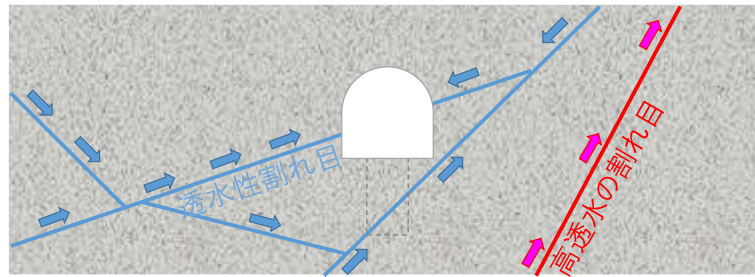
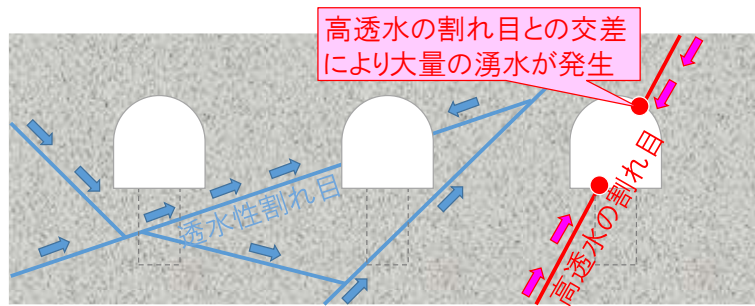


図 6.1.3-8 処分坑道数に対する中央の処分坑道 1 本あたりの湧水量の比較



(a) 単一坑道モデルの場合



(b) 複数坑道モデルの場合

図 6.1.3-9 高透水の割れ目との交差による大量湧水発生イメージ

次に、各モデルの両端の坑道湧水量（坑道数 1 本モデルの場合はその一本を端部とみなす）をモデル境界からの距離で整理した（図 6.1.3-10 参照）。すなわち、モデル境界からの距離が小さいものから順に、23.5m（坑道数 5 本モデル）、35.5m（坑道数 3 本モデル）、47.5m（坑道数 1 本モデル）の位置にある処分坑道の湧水量を示している。各リアライゼーションでばらつきが見られるが、両端の坑道がモデル境界に最も近くなる坑道数 5 本モデルでは、両端の坑道湧水量の平均が 12.58L/min であるのに対し、坑道数 3 本モデルでは 6.66L/min、坑道数 1 本モデルでは 10.73L/min と小さな値になった。これは、坑道数 5 本では端部の坑道がモデル境界に近づき、端部坑道のモデル境界側において動水勾配が大きくなったため端部坑道の湧水量が最も大きくなったと考えられる。一方、坑道数 3 本モデル端部の湧水量は坑道数 1 本モデルに比べて小さい値であるが、前述の通り合計湧水量が 2 倍近くに増加していることを勘案すると、坑道数が 1 本から 3 本に増えたことで湧水の流出域が分散した影響と考えられる。

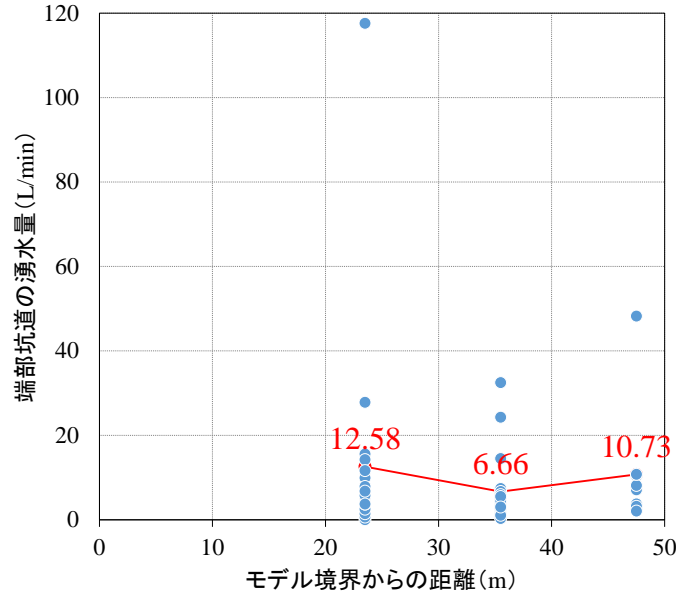


図 6.1.3-10 モデル境界からの距離に対する処分坑道の湧水量の比較

#### 4) 境界条件の妥当性に関する考察

次に、各モデルの中央の処分坑道に着目し、図 6.1.3-11 に中心坑道の湧水量を整理した。10 リライゼーションの湧水量の算術平均は、坑道数 1 本モデルで 10.73L/min、坑道数 3 本モデルでは 6.58L/min、坑道数 5 本モデルでは、6.24L/min であり、坑道数の増加に伴い湧水量は減少する傾向が得られた。特に坑道数 3 本モデルは 1 本モデルの約 61%と、湧水量が大幅に低下している。一方、坑道数 3 本モデルと 5 本モデルでは、中心坑道の湧水量の変化はほとんどなく、5%程度と小さい値であった。以上のことから、中心坑道の側方の境界条件は主に外側にある坑道に支配されていると考えられ、中央の処分坑道のみ着目するのであれば、解析モデルの側面の境界条件の影響は比較的小さいと考えられる。

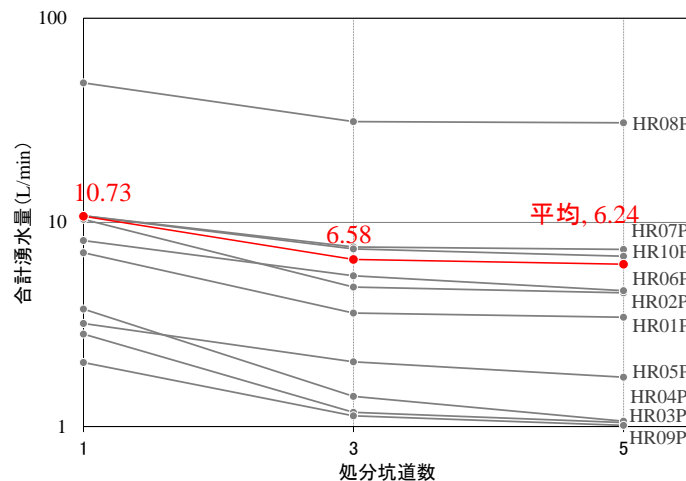


図 6.1.3-11 中心坑道湧水量の比較

次に、坑道数 5 本モデルの各処分坑道の湧水量を示したものを図 6.1.3-12 に示す。端部の坑道



(G1、G5) の湧水量は、中央部 3 本 (G2、G3、G4) の湧水量に比べて多いことから、モデル境界の水頭の影響を大きく受けていることが考えられる。一方で、中央部 3 本の坑道については、湧水量が 4.56L/min～6.24L/min とほぼ均等であることから、モデル境界の境界条件から受ける影響は小さいと考えられる。

なお、これらの 3 本の坑道 (G2、G3、G4) のうち中央の坑道 (G2) の湧水量が両隣の坑道 (G3、G4) よりも大きくなっている。これは、リアライゼーションを実施して作成した 10 個の解析モデルのひとつ (HR08P) で、中央の坑道 (G2) の湧水量が 30.77L/min と極端に大きくなっているためである。リアライゼーションにより割れ目の分布がばらつく中で、やや極端な割れ目分布のモデルが含まれることが主な要因である。

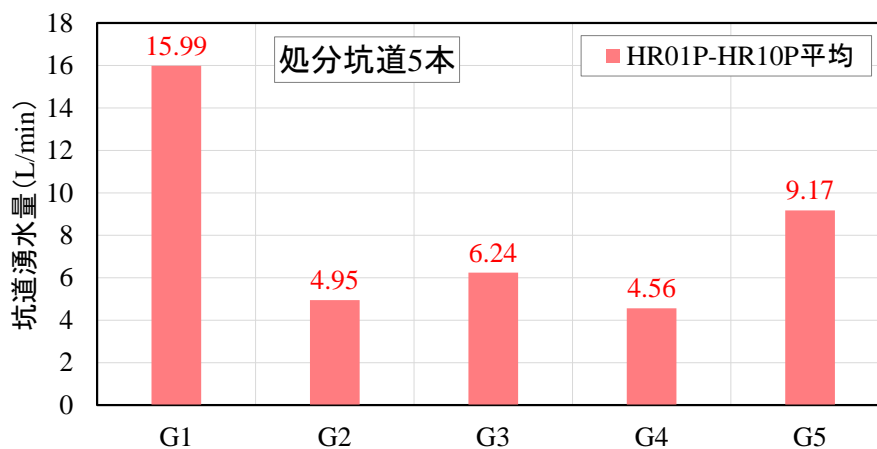


図 6.1.3-12 処分坑道 5 本モデルにおける各坑道湧水量

以上の結果から、本検討では坑道数 5 本のモデルを基本とし、中央部 3 本の処分坑道 (G2、G3、G4) については、処分パネルにおいて並列する処分坑道の湧水量を概ね表現できていると考えられる。したがって、処分坑道数 5 本のモデルを用いた解析結果の評価においては、これらの中央部 3 本の処分坑道 (G2、G3、G4) の解析結果を使用して記述するものとする。一方で、境界条件の影響を強く受けると考えられる両端部の処分坑道 (G1、G5) については、モデル境界面の影響を受けていると考えられることから、本検討における湧水量の評価には使用しないものとした。

#### 5) 処分坑道壁面の湧水量分布とその傾向

全 10 リアライゼーションの処分坑道掘削後の解析結果のうち、HR02P モデルにおいて中央の処分坑道 (G3) と交差し、0.1L/min 以上の湧水点となっている割れ目を図 6.1.3-13 に示す。また、中央部 3 本の処分坑道 (G2、G3、G4) の湧水量分布を図 6.1.3-14 に示す。表示されている割れ目の中で透水性が高く半径も大きい No.16480 割れ目に着目すると、この割れ目に沿って主要な湧水箇所が一直線上に並んでいることが分かる。以上の結果から、高透水の割れ目沿いに湧水が集中する状況が確認された。

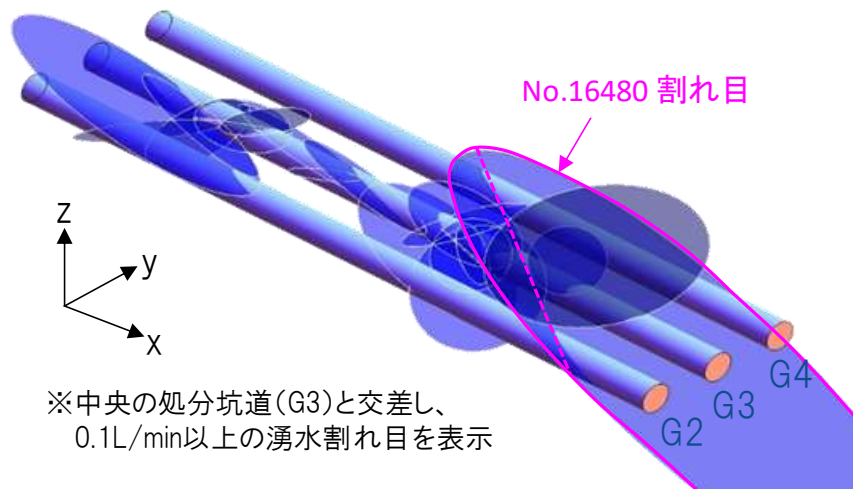


図 6.1.3-13 処分坑道掘削後の湧水割れ目の分布 (HR02P)

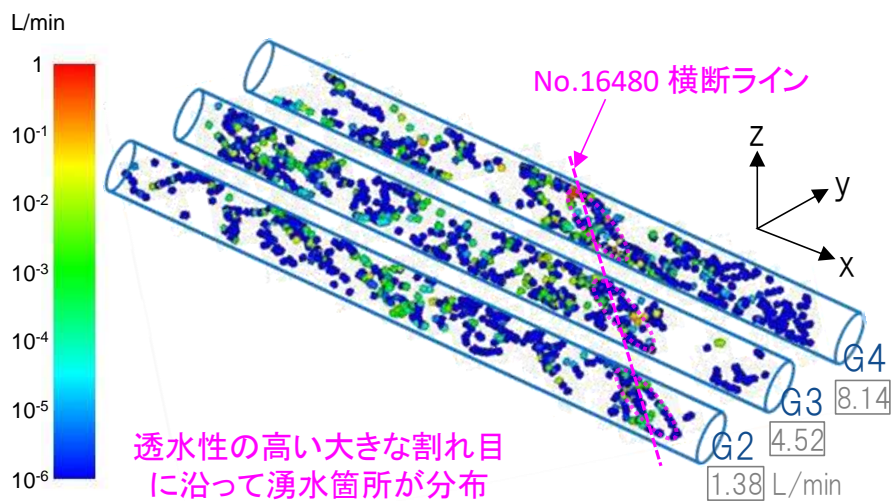


図 6.1.3-14 処分坑道掘削後の処分坑道壁面における湧水量分布 (HR02P)

## 6) 解析結果のまとめ

処分坑道掘削後の湧水挙動を再現するため、昨年度構築した水理地質構造モデルに、5本の並行する処分坑道をモデル化し、定常の浸透流解析を実施して坑道湧水量を算定した。

解析結果に基づき、それぞれの処分坑道数における処分坑道湧水を比較した結果、中央部3本の処分坑道（G2、G3、G4）については、処分パネルにおいて並行する処分坑道の湧水量を概ね表現できていることを確認した。そこで、これらの中央部3本の処分坑道（G2、G3、G4）を使用し湧水量等の評価を行うこととした。一方で、境界条件の影響を強く受けると考えられる両端部の処分坑道（G1、G5）については、モデル境界の影響を受けていると考えられることから、本検討における湧水量の評価には使用しないものとした。

以上の検討結果を踏まえ、中央部3本の処分坑道（G2、G3、G4）の坑道湧水量を表 6.1.3-4 に示す。この結果から、隣接する処分坑道をモデル化することで、処分坑道1本あたりの湧水量は大幅に減少することが分かった。10リアライゼーションの湧水量の算術平均を比較すると、単一坑道モデルと複数坑道モデルでの湧水量比は49%（単一坑道モデル平均値 10.73L/min に対し、複数坑道モデル平均値 5.25L/min）であった。

表 6.1.3-4 処分坑道掘削後の坑道湧水量のまとめ  
(単位：L/min)

モデル No.	坑道数1 [H27検討]	坑道数5 (P)			
	G 3 (±0m)	G 2 (-12m)	G 3 (±0m)	G 4 (+12m)	平均
HR01 (P)	7.10	2.49	3.43	4.49	3.47
HR02 (P)	10.35	1.38	4.52	8.14	4.68
HR03 (P)	2.84	0.56	1.05	4.11	1.91
HR04 (P)	3.76	1.63	1.06	1.11	1.27
HR05 (P)	3.20	6.04	1.74	0.09	2.62
HR06 (P)	8.15	3.60	4.63	0.61	2.95
HR07 (P)	10.78	1.95	7.37	4.08	4.47
HR08 (P)	48.25	4.91	30.77	20.51	18.73
HR09 (P)	2.06	24.44	1.01	0.77	8.74
HR10 (P)	10.77	2.50	6.83	1.69	3.67
算術平均	10.73	4.95	6.24	4.56	5.25

(4) 処分孔掘削後の湧水量についての検討

1) 検討方法

処分孔掘削後の湧水量についての検討を行うために、まず(3)で構築した複数処分孔モデルに設定した5本の処分坑道に対して、処分孔を1坑道あたり10箇所ずつモデル化した。処分孔の寸法やレイアウトは、「核燃料サイクル開発機構(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ」[15]におけるIV-209、図4.2.2-2に示す軟岩系岩盤の処分孔断面形状、およびIV-211表4.2.2-1に示す軟岩系岩盤の処分孔の間隔、処分孔縦置き方式の事例に基づく平成27年度の検討結果を利用して、以下のように設定した。

処分孔の形状は、核燃料サイクル開発機構(1999)[15]では直径2.22m、深さ4.13mの円柱である。また、処分孔は6.66m間隔で設置される。このことから図6.1.3-15に示すように、処分孔位置に相当する半径1.5m、深さ5.0mの範囲のパイプを大気圧境界に設定することで処分孔を再現することとした。処分孔間隔は核燃料サイクル開発機構(1999)[15]では6.66mであることから、6.6mピッチで処分孔の中心点を設定した。すなわち、100立方mのモデルでは処分坑道沿いに側方境界から20.3mの位置に1孔目を設置し、それを基準に6.6mピッチで10箇所設置した。この作成した10リアライゼーション分のモデルを用いて、処分孔掘削後の湧水挙動を再現するため、定常の浸透流解析を実施し、処分坑道及び処分孔の湧水量について検討を行った。

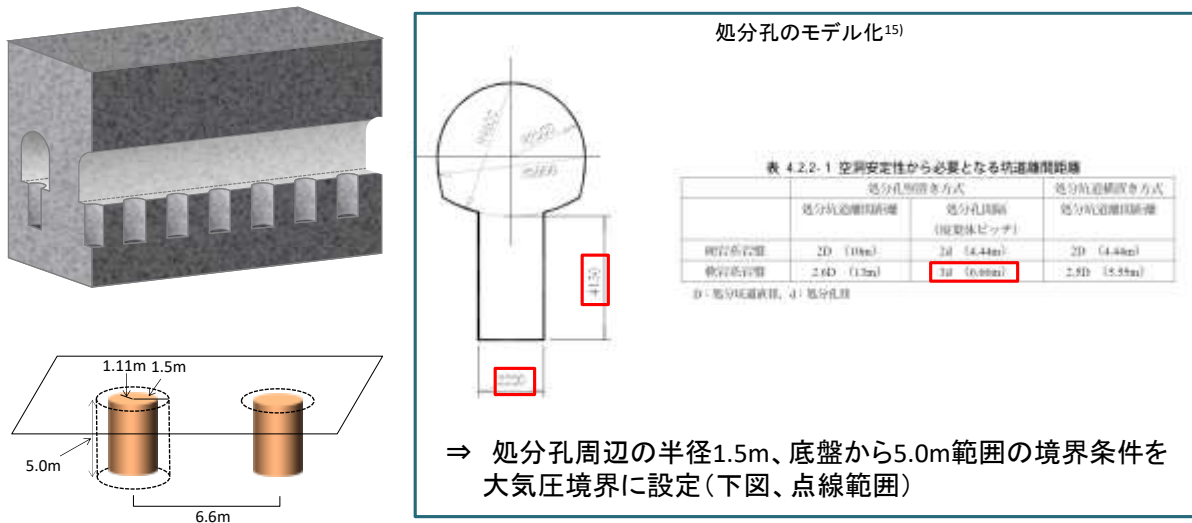


図 6.1.3-15 処分孔掘削後のモデル化

2) 解析結果 (湧水量データ)

複数坑道モデルを使用した浸透流解析結果に基づいて算定した処分孔掘削後の処分坑道および処分孔湧水量を、昨年度に実施した単一坑道モデルの解析結果と併せて表6.1.3-5にまとめた。なお、複数坑道モデルについては、4)の検証結果を踏まえ、処分坑道数5本に対し、解析モデルの中央部の3本のみ坑道湧水量の算定値を記載した。

表 6.1.3-5 処分孔掘削前後での処分坑道・処分孔湧水量のまとめ

モデル No.	坑道 位置	湧水量 (L/min)													増減率 (%)		湧水量 0.50L/min 以上の 処分孔数	
		処分孔 掘削前	処分孔掘削後															
			坑道	坑道	処分孔01	処分孔02	処分孔03	処分孔04	処分孔05	処分孔06	処分孔07	処分孔08	処分孔09	処分孔10	合計	坑道湧水		合計湧水
坑道数1【H27モデル】	HR01	G3(±0m)	7.10	4.65	0.12	0.35	0.17	0.04	0.46	0.04	0.74	0.45	0.53	0.00	7.55	65.5	106.3	2
	HR02	G3(±0m)	10.35	8.82	0.12	0.19	0.04	0.02	0.16	0.25	0.28	0.09	0.23	0.27	10.47	85.2	101.2	0
	HR03	G3(±0m)	2.84	2.04	0.05	0.07	0.08	0.20	0.01	0.00	0.32	0.29	0.00	0.00	3.06	71.8	107.7	0
	HR04	G3(±0m)	3.76	3.21	0.21	0.02	0.05	0.00	0.01	0.12	0.04	0.09	0.02	0.02	3.79	85.4	100.8	0
	HR05	G3(±0m)	3.20	2.13	0.06	0.11	0.02	0.20	0.82	0.00	0.00	0.56	0.00	0.00	3.90	66.6	121.9	2
	HR06	G3(±0m)	8.15	6.55	0.09	0.23	0.11	0.42	0.16	0.64	0.01	0.14	0.02	0.06	8.43	80.4	103.4	1
	HR07	G3(±0m)	10.78	7.70	0.01	0.01	0.04	0.95	0.11	0.35	0.32	1.15	0.88	0.17	11.69	71.4	108.4	3
	HR08	G3(±0m)	48.25	38.19	5.54	0.48	1.04	0.71	0.40	1.47	0.78	0.34	0.05	0.01	49.01	79.2	101.6	5
	HR09	G3(±0m)	2.06	1.57	0.02	0.00	0.06	0.09	0.00	0.00	0.17	0.10	0.09	0.47	2.57	76.2	124.8	0
	HR10	G3(±0m)	10.77	9.22	0.07	0.19	0.97	0.03	0.14	0.07	0.05	0.04	0.01	0.04	10.83	85.6	100.6	1
平均			10.73	8.41	0.27 (処分孔1孔あたり平均)										11.13	78.4	103.8	1.40
坑道数5【H28モデル】	HR01P	G2(-12m)	2.49	1.88	0.00	0.00	0.04	0.06	0.16	0.02	0.02	0.11	0.01	0.00	2.30	75.5	92.4	0
		G3(±0m)	3.43	2.17	0.04	0.22	0.08	0.03	0.21	0.01	0.32	0.19	0.24	0.00	3.51	63.3	102.3	0
		G4(+12m)	4.49	2.91	0.10	0.15	0.03	0.02	0.00	0.25	0.49	0.17	0.90	0.00	5.02	64.8	111.8	1
	HR02P	G2(-12m)	1.38	1.16	0.06	0.01	0.10	0.02	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	1.41	84.1	102.2	0
		G3(±0m)	4.52	3.51	0.04	0.02	0.01	0.02	0.10	0.15	0.15	0.12	0.16	0.28	4.56	77.7	100.9	0
		G4(+12m)	8.14	5.54	0.12	0.11	0.02	0.03	0.02	0.11	2.15	0.18	0.34	0.00	8.62	68.1	105.9	1
	HR03P	G2(-12m)	0.56	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.02	0.00	0.00	0.51	76.8	91.1	0
		G3(±0m)	1.05	0.62	0.04	0.02	0.04	0.06	0.01	0.00	0.18	0.14	0.00	0.00	1.11	59.0	105.7	0
		G4(+12m)	4.11	2.47	0.00	0.18	0.08	0.05	0.03	0.05	0.26	0.06	0.75	0.00	3.93	60.1	95.6	1
	HR04P	G2(-12m)	1.63	1.06	0.01	0.02	0.03	0.00	0.01	0.33	0.13	0.09	0.01	0.02	1.71	65.0	104.9	0
		G3(±0m)	1.06	0.98	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	1.05	92.5	99.1	0
		G4(+12m)	1.11	0.44	0.11	0.06	0.00	0.04	0.00	0.20	0.02	0.03	0.01	0.01	0.92	39.6	82.9	0
	HR05P	G2(-12m)	6.04	4.84	0.01	0.05	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	0.46	0.59	6.00	80.1	99.3	1
		G3(±0m)	1.74	0.94	0.00	0.02	0.01	0.09	0.71	0.00	0.00	0.47	0.00	0.00	2.24	54.0	128.7	1
		G4(+12m)	0.09	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.94	88.9	1044.4	1
	HR06P	G2(-12m)	3.60	3.43	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.04	3.53	95.3	98.1	0
		G3(±0m)	4.63	3.91	0.10	0.12	0.04	0.12	0.06	0.32	0.00	0.05	0.00	0.00	4.72	84.4	101.9	0
		G4(+12m)	0.61	0.44	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.52	72.1	85.2	0
	HR07P	G2(-12m)	1.95	1.38	0.01	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.49	2.33	70.8	119.5	0
		G3(±0m)	7.37	4.34	0.00	0.01	0.02	0.79	0.10	0.25	0.33	1.05	0.82	0.18	7.89	58.9	107.1	3
G4(+12m)		4.08	2.41	0.24	0.02	0.20	1.01	0.78	0.39	0.03	0.00	0.00	0.07	5.15	59.1	126.2	2	
HR08P	G2(-12m)	4.91	4.24	0.05	0.01	0.08	0.03	0.12	0.01	0.19	0.09	0.06	0.14	5.02	86.4	102.2	0	
	G3(±0m)	30.77	21.20	4.36	0.64	0.88	0.54	0.26	1.19	0.52	0.08	0.02	0.02	29.71	68.9	96.6	6	
	G4(+12m)	20.51	13.31	0.59	0.49	0.52	0.53	2.59	2.89	2.92	1.52	0.07	0.19	25.62	64.9	124.9	7	
HR09P	G2(-12m)	24.44	23.65	0.13	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	1.22	25.06	96.8	102.5	1	
	G3(±0m)	1.01	0.72	0.00	0.00	0.01	0.09	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.31	1.16	71.3	114.9	0	
	G4(+12m)	0.77	0.65	0.00	0.02	0.00	0.06	0.01	0.02	0.00	0.03	0.03	0.00	0.82	84.4	106.5	0	
HR10P	G2(-12m)	2.50	1.80	0.02	0.15	0.00	0.05	0.12	0.27	0.04	0.08	0.09	0.04	2.66	72.0	106.4	0	
	G3(±0m)	6.83	5.63	0.47	0.09	0.24	0.02	0.07	0.04	0.03	0.04	0.01	0.04	6.68	82.4	97.8	0	
	G4(+12m)	1.69	0.99	0.00	0.02	0.03	0.10	0.13	0.05	0.00	0.02	0.03	0.00	1.37	58.6	81.1	0	
平均	G2(-12m)	4.95	4.39	0.07 (処分孔1孔あたり平均)										5.05	88.6	102.1	0.20	
	G3(±0m)	6.24	4.40	0.19 (処分孔1孔あたり平均)										6.26	70.5	100.4	1.00	
	G4(+12m)	4.56	2.92	0.24 (処分孔1孔あたり平均)										5.29	64.1	116.0	1.30	
	G2-4共通	5.25	3.90	0.16 (処分孔1孔あたり平均)										5.54	74.4	105.4	0.83	
増減率 (%)	H28/H27	48.9	46.4	59.9 (処分孔1孔あたり平均)										49.7			59.5	

### 3) 処分坑道湧水量に関する考察

表 6.1.3-6 に処分孔掘削前後の処分坑道湧水量（全リアライゼーション結果の平均値）を示した。坑道数 1 本の単一坑道モデルについては、平成 27 年の検討結果と同様に、処分孔掘削後に処分坑道の湧水量が減少した（平均で 10.73L/min から 8.41L/min へ 2.32L/min 減少）。また、同様に坑道数 5 本の複数坑道モデルについても、すべての処分坑道、リアライゼーションで湧水量が減少した（図 6.1.3-16）。G2 平均では 4.95L/min から 4.39L/min へ 0.56L/min 減少、G3 平均では 6.24L/min から 4.40L/min へ 1.84L/min 減少、G4 平均では 4.56L/min から 2.92L/min へ 1.64L/min 減少した。また中心 3 坑道平均では 5.25L/min から 3.90L/min 減少した。以上より、処分孔を掘削することにより処分坑道湧水量が減少することが確認された。これは、処分坑道に交差し水みちとなっていた割れ目が、処分孔の掘削により遮断されるなどして、元々処分坑道へ流出していた湧水が処分孔へ流出するようになったことが原因と考えられる（図 6.1.3-17 参照）。また、湧水量の増減については、単一坑道モデルで 78.4%、複数坑道モデル（中心 3 坑道平均）で 74.4%と、ほとんど同等の値であった。

表 6.1.3-6 処分孔掘削前後の処分坑道湧水量（全リアライゼーションの平均値）

モデル No.	坑道位置	処分坑道湧水量 (L/min)		増減量 (L/min)	増減 (%)
		処分孔掘削前	処分孔掘削後		
H27モデル	G3(±0m)	10.73	8.41	-2.32	78.4
H28モデル	G2(-12m)	4.95	4.39	-0.56	88.6
	G3(±0m)	6.24	4.40	-1.84	70.5
	G4(+12m)	4.56	2.92	-1.64	64.1
	G2-G4平均	5.25	3.90	-1.35	74.4

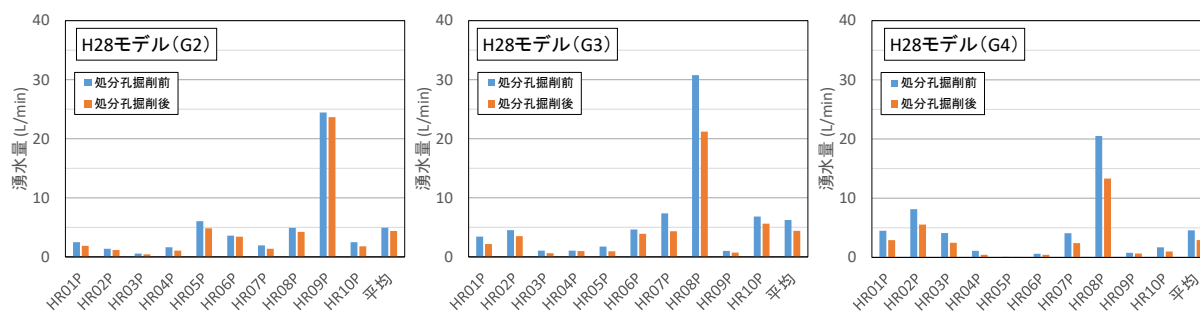
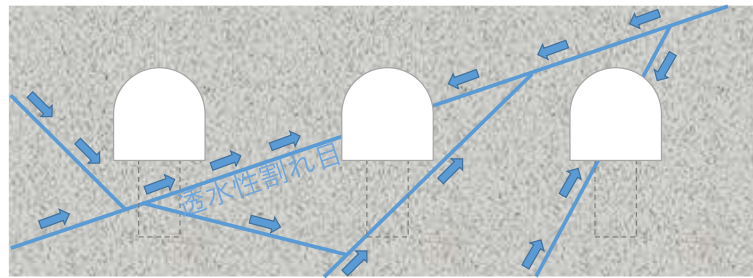
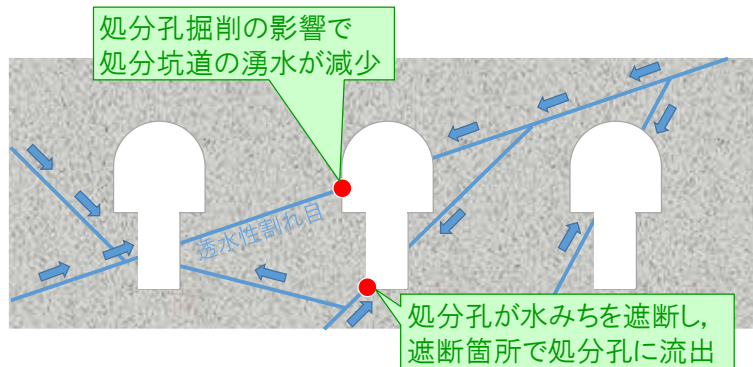


図 6.1.3-16 処分孔掘削前後の処分坑道湧水量（H28 モデル）





(a) 処分孔掘削前の地下水浸透



(b) 処分孔掘削後の地下水浸透

図 6.1.3-17 透水性割れ目と処分孔の交差による浸透流経路変化のイメージ

4) 処分坑道および処分孔の合計湧水量に関する考察

処分坑道と処分孔の合計湧水量について、掘削の影響を確認する。坑道数 1 本の解析モデルについては、平成 27 年の検討結果と同様に、処分孔掘削後の処分坑道、処分孔の合計湧水量は増加している (10.73L/min から 11.13L/minへ 2.72L/min 増加 (湧水量比 103.8%))。また坑道数 5 本モデルについても、すべての処分坑道で合計湧水量が増加しており、中心 3 坑道平均では 5.25L/min から 5.54L/minへ 0.29L/min 増加 (同 105.4%) した。これは、処分孔の掘削面が新たな大気圧境界面となり、地下水の流出域が増加したためである。しかしながら、リアライゼーション毎に見てみると、一部 (例えば、HR04P、HR08P、HR10P の中央の坑道 (G3)) で湧水量の減少が確認された (図 6.1.3-18)。これは、隣接する処分坑道の処分孔掘削により、元々流出に寄与していた水みちが遮断されるなどした場合に湧水量が減ったためである (図 6.1.3-19 参照)。以上より、処分孔を掘削することで、処分孔が新たな流出域となり合計の湧水量は概ね増加することが確認された。ただし、複数坑道をモデル化することで、隣接する処分坑道の処分孔と交差している割れ目の影響を受け、流量が減少する現象も一部で確認された。

表 6.1.3-7 処分孔掘削前後の湧水量の比較 (全リアライゼーションの平均値)

モデル No.	坑道位置	湧水量 (L/min)				増減量 (L/min)	増減 (%)
		処分孔掘削前		処分孔掘削後			
		処分坑道	処分坑道	処分孔合計湧水量	処分坑道・処分孔合計湧水量		
H27モデル	G3(±1m)	10.73	8.41	2.72	11.13	2.72	103.8
	G2(-12m)	4.95	4.39	0.67	5.05	0.10	102.1
H28モデル	G3(±0m)	6.24	4.40	1.86	6.26	0.02	100.4
	G4(+12m)	4.56	2.92	2.37	5.29	0.73	116.0
	G2-4共通	5.25	3.90	1.63	5.54	0.29	105.4



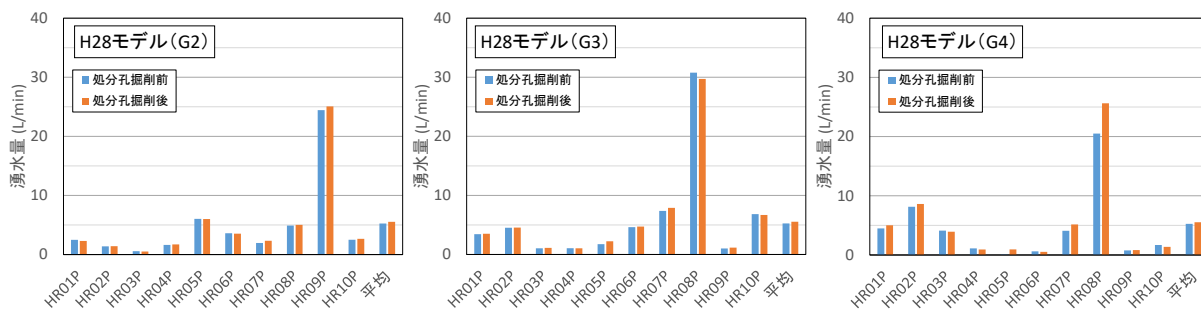


図 6.1.3-18 処分坑道湧水量と処分孔掘削後の合計湧水量との比較

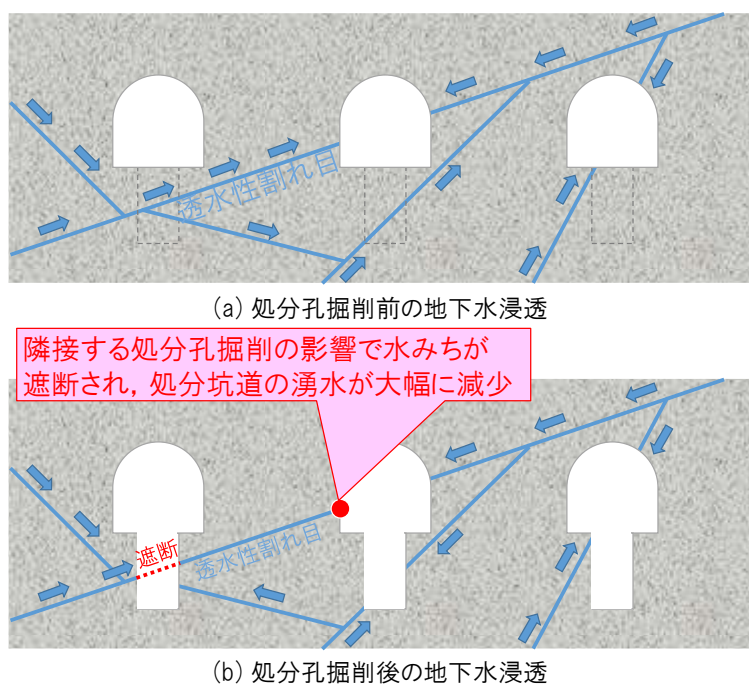


図 6.1.3-19 隣接する処分孔掘削による処分坑道湧水量の減少イメージ

### 5) 処分坑道数の違いによる湧水量の比較

ここでは、坑道数 1 本モデルと坑道数 5 本モデルの湧水量の比較を行った。処分孔掘削前後の処分坑道の湧水量について、坑道数 1 本モデルと坑道数 5 本モデルの湧水量の比較結果を表 6.1.3-8 にまとめた。処分孔掘削後の坑道数 1 本モデルと 5 本モデル（中心 3 坑道の平均）の坑道 1 本当たりの湧水量は 8.41L/min から 3.90L/min ～ 4.50L/min 減少した（湧水量比 46.4%）。

以上の結果から、処分孔掘削後も処分孔掘削前（処分坑道掘削後）と同様に、並行する複数の坑道をモデル化することで、湧水の流出域が拡大し、処分坑道 1 本当たりの湧水量がおおよそ半減することが確認された。

表 6.1.3-8 坑道数 1 本モデルと坑道数 5 本モデルの湧水量の比較

モデル No.	坑道位置	湧水量 (L/min)		
		処分孔掘削前	処分孔掘削後	
		坑道	坑道	処分坑道・処分孔合計湧水量
H27モデル	G3(±0m)	10.73	8.41	11.13
H28モデル	G2(-12m)	4.95	4.39	5.05
	G3(±0m)	6.24	4.40	6.26
	G4(+12m)	4.56	2.92	5.29
	G2-4共通	5.25	3.90	5.54
増減率 (%)	H28/H27	48.9	46.4	49.7

次に、処分孔の湧水量を表 6.1.3-9 に整理した。処分孔湧水量は、坑道数 1 本モデルで最小値 0.00L/min から最大値 5.54L/min、坑道数 5 本モデルで最小値 0.00L/min から最大値 4.36L/min の範囲にあり、リアライゼーションごと、処分孔ごとに値のばらつきが見られた。坑道数 1 本モデルと 5 本モデル（中心 3 坑道の平均）の処分孔 1 孔当たりの湧水量については、0.27L/min から 0.16L/min へ 0.11L/min 減少した（湧水量比 59.9%）。

また、緩衝材の施工品質確保が困難となる処分孔湧水量の基準値を、0.5L/min と仮定し、0.5L/min を超える処分孔の数（超過個数）を整理した。超過個数は、各リアライゼーションでの結果の平均で坑道数 1 本モデルでは 1.40 個、5 本モデルで 0.83 個と 0.57 個分減少した（超過個数比 59.5%）。以上の結果から、複数坑道モデルでは、湧水の流出域の分散により、処分孔 1 孔当たりの湧水量は減少しており、超過個数も概ね同じ割合で減少することが分かった。

なお、リアライゼーション HR08P モデルのように、坑道数 1 本モデルよりも 5 本モデルの方が中央の処分坑道（G3）での超過個数が増加（坑道数 1 本モデル：10 孔中 5 孔→坑道数 5 本モデル：10 孔中 6 孔）するケースも見られた。この要因として、複数坑道のモデル化により、坑道数 1 本モデルでは独立していた割れ目が隣接する処分坑道の EDZ 等を介して繋がり、新たな水みちとなったと考えられる。

表 6.1.3-9 坑道数 1 本モデルと坑道数 5 本モデルの処分孔湧水量の比較

モデル No.	坑道位置	処分孔湧水量 (L/min)											湧水量 0.50L/min 以上の 処分孔数	
		処分孔01	処分孔02	処分孔03	処分孔04	処分孔05	処分孔06	処分孔07	処分孔08	処分孔09	処分孔10	平均		
坑道数1 [H27モデル]	HR01	G3(±0m)	0.12	0.35	0.17	0.04	0.46	0.04	0.74	0.45	0.53	0.00	0.29	2
	HR02	G3(±0m)	0.12	0.19	0.04	0.02	0.16	0.25	0.28	0.09	0.23	0.27	0.17	0
	HR03	G3(±0m)	0.05	0.07	0.08	0.20	0.01	0.00	0.32	0.29	0.00	0.00	0.10	0
	HR04	G3(±0m)	0.21	0.02	0.05	0.00	0.01	0.12	0.04	0.09	0.02	0.02	0.06	0
	HR05	G3(±0m)	0.06	0.11	0.02	0.20	0.82	0.00	0.00	0.56	0.00	0.00	0.18	2
	HR06	G3(±0m)	0.09	0.23	0.11	0.42	0.16	0.64	0.01	0.14	0.02	0.06	0.19	1
	HR07	G3(±0m)	0.01	0.01	0.04	0.95	0.11	0.35	0.32	1.15	0.88	0.17	0.40	3
	HR08	G3(±0m)	5.54	0.48	1.04	0.71	0.40	1.47	0.78	0.34	0.05	0.01	1.08	5
	HR09	G3(±0m)	0.02	0.00	0.06	0.09	0.00	0.00	0.17	0.10	0.09	0.47	0.10	0
	HR10	G3(±0m)	0.07	0.19	0.97	0.03	0.14	0.07	0.05	0.04	0.01	0.04	0.16	1
平均		0.27 (処分孔1孔あたり平均)											1.40	
坑道数5 [H28モデル]	HR01P	G2(-12m)	0.00	0.00	0.04	0.06	0.16	0.02	0.02	0.11	0.01	0.00	0.04	0
		G3(±0m)	0.04	0.22	0.08	0.03	0.21	0.01	0.32	0.19	0.24	0.00	0.13	0
		G4(+12m)	0.10	0.15	0.03	0.02	0.00	0.25	0.49	0.17	0.90	0.00	0.21	1
	HR02P	G2(-12m)	0.06	0.01	0.10	0.02	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.03	0
		G3(±0m)	0.04	0.02	0.01	0.02	0.10	0.15	0.15	0.12	0.16	0.28	0.11	0
	HR03P	G4(+12m)	0.12	0.11	0.02	0.03	0.02	0.11	2.15	0.18	0.34	0.00	0.31	1
		G2(-12m)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.02	0.00	0.00	0.01	0
		G3(±0m)	0.04	0.02	0.04	0.06	0.01	0.00	0.18	0.14	0.00	0.00	0.05	0
	HR04P	G4(+12m)	0.00	0.18	0.08	0.05	0.03	0.05	0.26	0.06	0.75	0.00	0.15	1
		G2(-12m)	0.01	0.02	0.03	0.00	0.01	0.33	0.13	0.09	0.01	0.02	0.07	0
		G3(±0m)	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0
	HR05P	G4(+12m)	0.11	0.06	0.00	0.04	0.00	0.20	0.02	0.03	0.01	0.01	0.05	0
		G2(-12m)	0.01	0.05	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	0.46	0.59	0.12	1
		G3(±0m)	0.00	0.02	0.01	0.09	0.71	0.00	0.00	0.47	0.00	0.00	0.13	1
	HR06P	G4(+12m)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	1
		G2(-12m)	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.04	0.01	0
		G3(±0m)	0.10	0.12	0.04	0.12	0.06	0.32	0.00	0.05	0.00	0.00	0.08	0
	HR07P	G4(+12m)	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0
		G2(-12m)	0.01	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.49	0.10	0
		G3(±0m)	0.00	0.01	0.02	0.79	0.10	0.25	0.33	1.05	0.82	0.18	0.36	3
	HR08P	G4(+12m)	0.24	0.02	0.20	1.01	0.78	0.39	0.03	0.00	0.00	0.07	0.27	2
		G2(-12m)	0.05	0.01	0.08	0.03	0.12	0.01	0.19	0.09	0.06	0.14	0.08	0
		G3(±0m)	4.36	0.64	0.88	0.54	0.26	1.19	0.52	0.08	0.02	0.02	0.85	6
	HR09P	G4(+12m)	0.59	0.49	0.52	0.53	2.59	2.89	2.92	1.52	0.07	0.19	1.23	7
		G2(-12m)	0.13	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	1.22	0.14	1
		G3(±0m)	0.00	0.00	0.01	0.09	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.31	0.04	0
	HR10P	G4(+12m)	0.00	0.02	0.00	0.06	0.01	0.02	0.00	0.03	0.03	0.00	0.02	0
		G2(-12m)	0.02	0.15	0.00	0.05	0.12	0.27	0.04	0.08	0.09	0.04	0.09	0
G3(±0m)		0.47	0.09	0.24	0.02	0.07	0.04	0.03	0.04	0.01	0.04	0.11	0	
平均	G4(+12m)	0.00	0.02	0.03	0.10	0.13	0.05	0.00	0.02	0.03	0.00	0.04	0	
	G2(-12m)	0.07 (処分孔1孔あたり平均)											0.20	
	G3(±0m)	0.19 (処分孔1孔あたり平均)											1.00	
	G4(+12m)	0.24 (処分孔1孔あたり平均)											1.30	
増減率 (%)	H28/H27	59.9 (処分孔1孔あたり平均)											59.5	

6) 坑道湧水量の分布

各リアライゼーションで中央の G2~G4 の処分坑道に交差する割れ目のうち、 $6.0 \times 10^{-5} \text{L/min}$  以上の流量をもつ割れ目の流量を大きいものから降順で一覧にしたものを巻末資料 A に示す。このうち、HR08P モデルのデータを表 6.1.3-10 に示す。

また、各リアライゼーションの坑道壁面の湧水量分布も巻末資料 A にまとめており、このうち HR08P モデルの坑道掘削後の湧水量分布を図 6.1.3-20 に示す。湧水量分布を見ると、坑道壁面全体に異なる流量の割れ目が不規則に分布しておりその不均質性が確認できる。一部に連続して分布している箇所も見られ、処分坑道との交差部において比較的大きな湧水の流出を確認できる。

表 6.1.3-10 坑道に交差する主要な割れ目の流量算定結果 (HR08P)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
17145	8.10E-01	17145	5.12E+00	17147	4.61E+00
17147	2.68E-01	17147	3.40E+00	17143	1.61E+00
17112	2.47E-01	17143	1.38E+00	17141	5.36E-01
17118	1.98E-01	17128	1.25E+00	17098	4.08E-01
16938	1.19E-01	17113	3.52E-01	17128	4.03E-01
17037	9.54E-02	17141	3.30E-01	17074	2.40E-01
17124	8.77E-02	16556	2.85E-01	17047	1.73E-01
16788	7.17E-02	17047	2.50E-01	17126	1.59E-01
17101	6.67E-02	17118	1.93E-01	17084	1.34E-01
17015	5.40E-02	17088	1.77E-01	17061	1.25E-01
16746	4.00E-02	17017	1.65E-01	16206	1.09E-01
16969	3.00E-02	16657	1.23E-01	16946	7.29E-02
16959	2.49E-02	17002	1.14E-01	17017	6.33E-02
16877	2.19E-02	17124	1.08E-01	17038	5.82E-02
17028	1.72E-02	16971	8.53E-02	16429	5.01E-02
16618	1.31E-02	17037	8.14E-02	16811	4.30E-02
13865	1.30E-02	17074	5.55E-02	17035	4.06E-02
16814	9.06E-03	16906	5.01E-02	16556	3.70E-02
16789	8.20E-03	17061	4.50E-02	16949	3.32E-02
16379	7.88E-03	16901	3.67E-02	16922	2.49E-02
17032	6.88E-03	16660	2.96E-02	17088	2.12E-02
16856	6.11E-03	16625	2.64E-02	16996	1.54E-02
16427	4.74E-03	16500	1.92E-02	17002	1.45E-02
17114	3.93E-03	16448	1.78E-02	17113	3.12E-03
16552	3.21E-03	16258	1.78E-02	16767	2.69E-03
16344	2.17E-03	15756	9.20E-03	7334	2.22E-03
16310	1.66E-03	16160	5.96E-03	16546	7.32E-04
16855	1.52E-03	15169	5.06E-03	3352	1.29E-04
9299	8.24E-04	16789	1.75E-03	2829	1.07E-04
10602	2.93E-04	15225	5.43E-04	2589	1.03E-04
11285	7.55E-05	8612	3.12E-04	5035	9.59E-05
16088	7.27E-05	11769	1.46E-04	13994	9.24E-05
13546	6.57E-05	15602	1.01E-04	14334	7.43E-05
14063	6.44E-05	8878	9.85E-05		
		15715	9.01E-05		
		8303	7.34E-05		
		14058	7.28E-05		

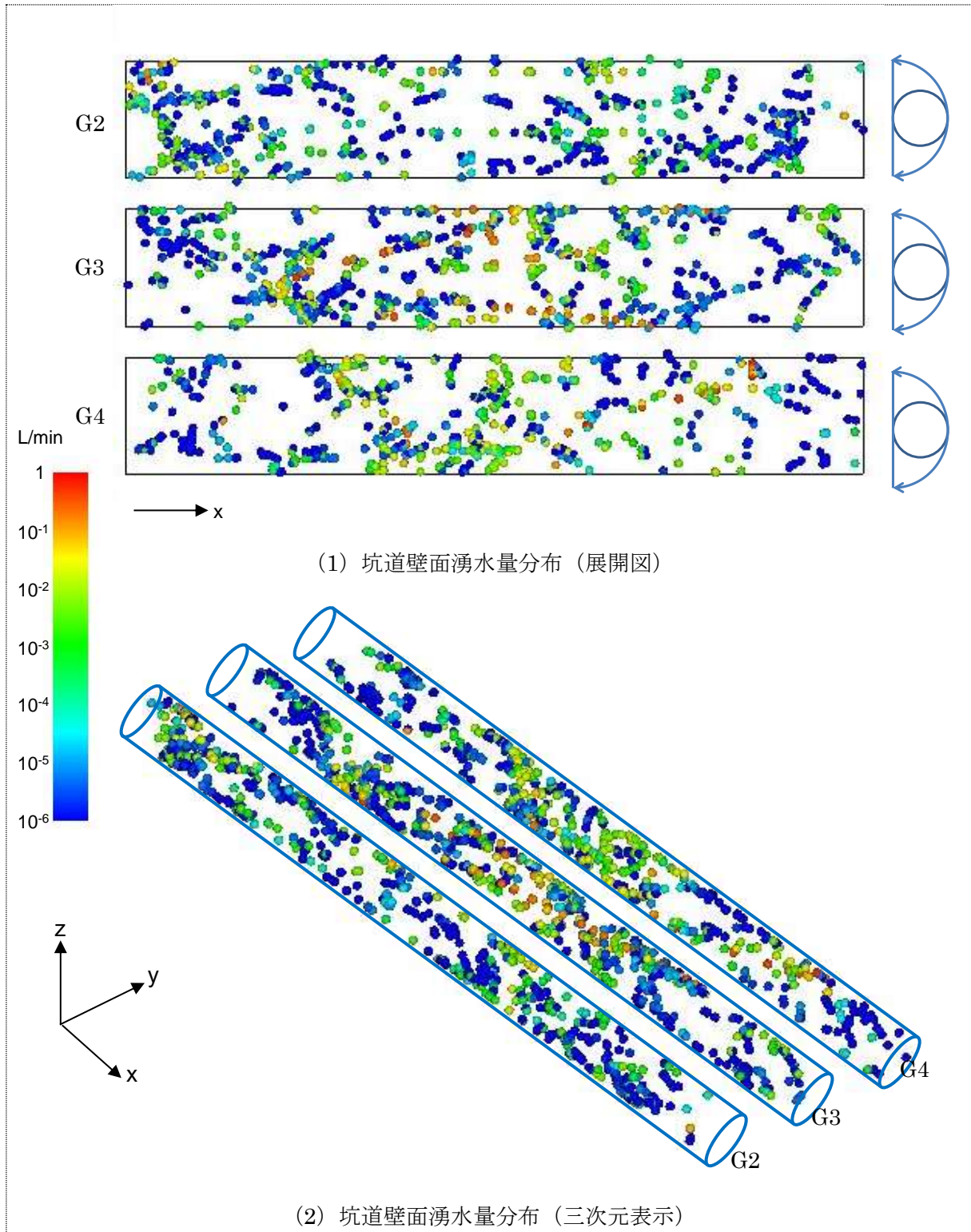


図 6.1.3-20 坑道壁面の湧水量分布 (HR08P)



## 7) 処分孔湧水量の分布

各リアライゼーションの処分孔毎の湧水量のグラフを図 6.1.3-21 に示す。

本解析では EDZ の透水係数 ( $1.0 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ ) を透水割れ目の透水係数 ( $6.0 \times 10^{-9} \text{m/sec}$ ) より大きく設定したため、処分孔へ EDZ から流出する量が多くなることが予想された。そこで、処分孔湧水に占める EDZ からの湧水量の割合を表 6.1.3-11 に示す。昨年度 (平成 27 年度) の単一坑道の解析モデルでは、EDZ からの湧水量の割合は最小 12% から最大 45% であったのに対し、本年度 (平成 28 年度) の複数坑道モデルでは、EDZ からの湧水量の割合は、中央坑道 (G3) で最小 12.0% から最大 99.8% であった。EDZ からの湧水量の割合が 100% に近い箇所は、隣接坑道に水みちが遮断され処分孔への湧水が減少した箇所と考えられる。また、中央坑道 (G3) に隣接する両坑道 (G2、G4) を含めた EDZ からの湧水量の割合は、最小 1.0% から最大 100.0% で、坑道内の割れ目の交差の仕方によって、湧水の流入点が大きく変化することが分かった。

表 6.1.3-11 処分孔湧水に占める EDZ からの湧水量の割合

《G2 坑道 [-12m]》		《G3 坑道 [中央]》		《G4 [+12m]》	
処分孔01	79.5	処分孔01	18.7	処分孔01	1.0
処分孔02	95.3	処分孔02	14.3	処分孔02	16.4
処分孔03	38.6	処分孔03	34.4	処分孔03	50.4
処分孔04	93.8	処分孔04	15.5	処分孔04	17.9
処分孔05	99.9	処分孔05	47.5	処分孔05	2.9
処分孔06	87.5	処分孔06	12.0	処分孔06	3.9
処分孔07	5.7	処分孔07	31.9	処分孔07	58.4
処分孔08	65.3	処分孔08	56.9	処分孔08	14.9
処分孔09	2.2	処分孔09	94.8	処分孔09	67.1
処分孔10	7.2	処分孔10	99.8	処分孔10	100.0

各処分孔と交差する割れ目のうち、 $0.01 \text{L/min}$  の流量を持つ割れ目の分布と処分孔湧水量分布を巻末資料 A にまとめた。このうち HR08P モデルの出力図を図 6.1.3-22 に示す。平成 27 年度と同様に EDZ からの湧水量が多いため、処分孔の坑道近傍に湧水箇所が分布していることが分かる。また、EDZ からの湧水量は  $10^{-2} \text{L/min}$  以下のプロットが多いが、 $10^{-1} \text{L/min}$  以上の特に湧水量の大きい箇所は割れ目起源であることが多い。

湧水量が最も多いリアライゼーション HR08P モデルを用いて、割れ目の分布と湧水量の分布の関連を調査した。モデル中で最大級の割れ目 No.17147 と No.17145 に着目し、その分布位置を示したものが図 6.1.3-23 である。割れ目 No.17147 は、中央の処分坑道 (G2) の処分孔では No.1、No.2 孔と交差する。また、隣接する処分坑道 (G4) の処分孔では、No.6・No.7・No.8 と交差する。そのため、処分坑道湧水や処分孔でも各々に該当する位置で湧水量が多くなっている。また、中央の処分坑道 (G3) の処分孔 No.1 で最大湧水量  $4.36 \text{L/min}$  を示すのはこの割れ目が主たる要因と考えられる。割れ目 No.17145 は坑道に平行な割れ目で広範囲に処分坑道と交差する。坑道とは距離程 35-60m 付近で交差し、処分孔では No.3、No.4、No.5、No.6 孔と交差し、各々に該当する位置で湧水量が多くなっている。処分孔では交差する 4 孔共にこの割れ目から  $0.1 \text{L/min}$  以上の湧水を示す。一方で、隣接する処分坑道とその処分孔とは交差していない。

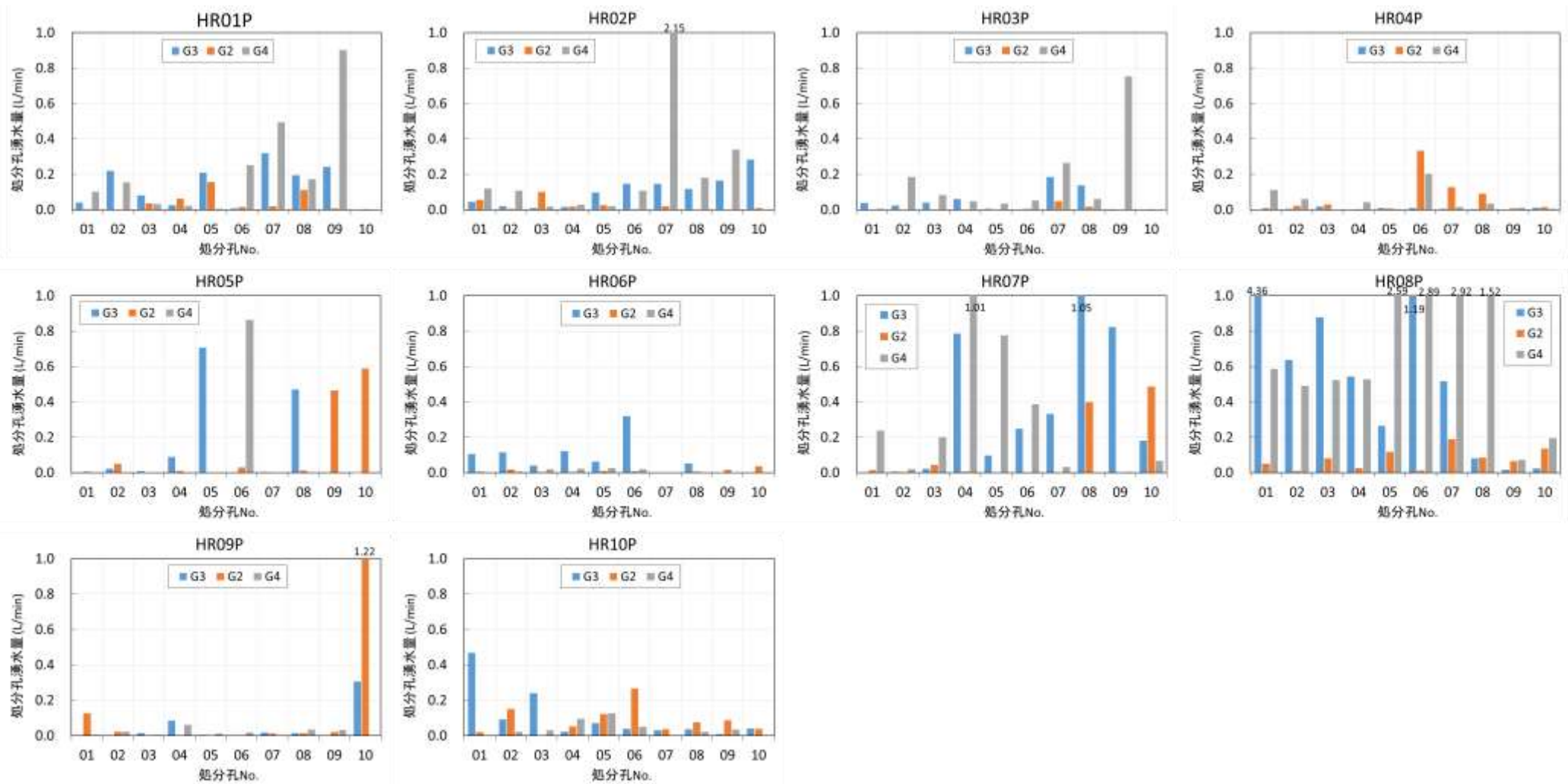
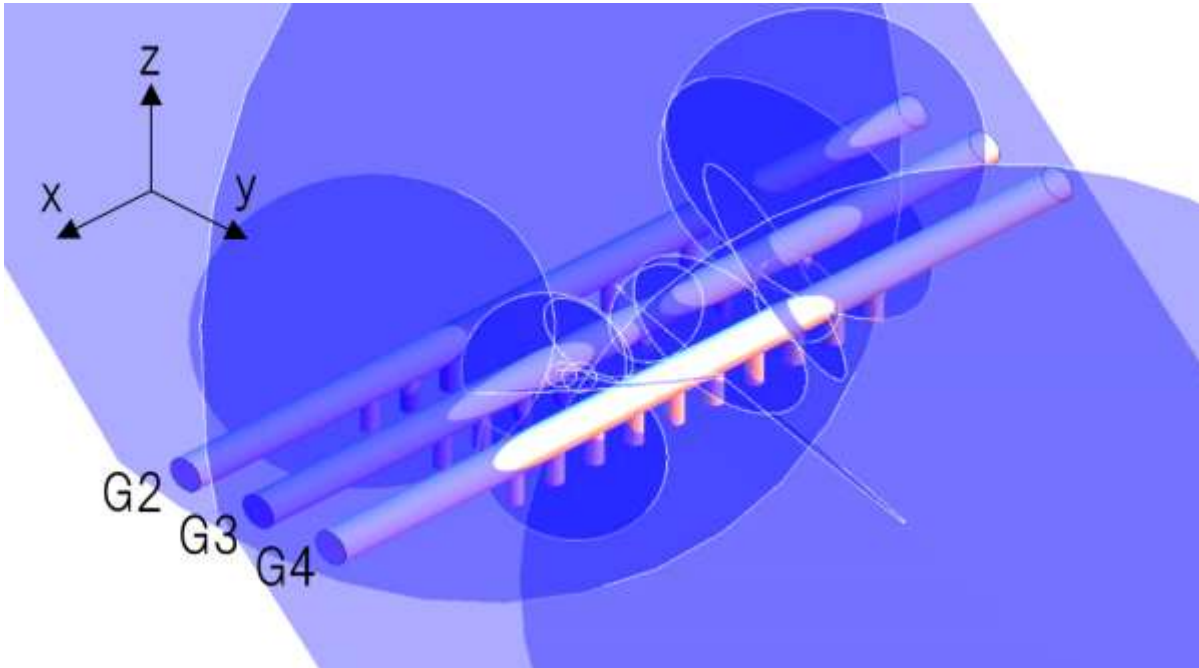


図 6.1.3-21 処分孔毎の湧水量算定結果



処分孔と交差する割れ目 (0.01L/min 以上)



処分孔との交差割れ目分布



処分孔湧水量分布

図 6.1.3-22 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HR08P)

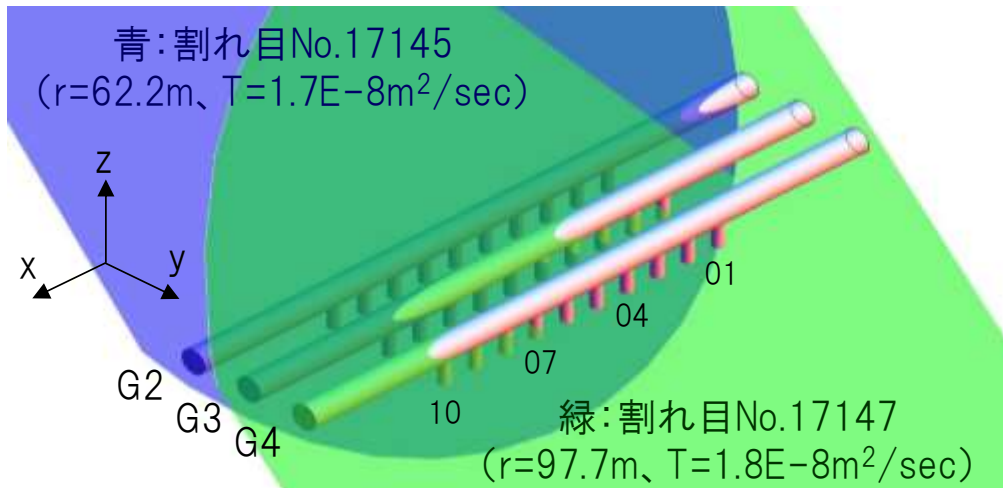


図 6.1.3-23 HR01P モデルにおける湧水量の多い割れ目の分布

8) 解析結果のまとめ

処分孔掘削後の湧水挙動を再現するため、昨年度構築した水理地質構造モデルに、5本の並行する処分坑道および処分孔をモデル化し、浸透流解析を実施して坑道湧水量ならびに処分孔湧水量を算定した。

この結果、隣接する処分坑道をモデル化することで、湧水量が 0.5L/min を超える処分孔の数は大幅に減少する結果が得られた。これは、複数坑道をモデル化することによって、湧水箇所が分散したためで、6)で述べた処分坑道掘削後の解析結果と同様の結果である。0.5L/min を超える処分孔の割合を単一坑道モデルと複数坑道モデルで比較すると、10リアライゼーションの平均比で 59%に減少した。

表 6.1.3-12 湧水量が 0.5L/min を超える処分孔の割合のまとめ

モデル No.	単一坑道 (H27検討)	複数坑道(P) (H28検討)				増減比
		G3	G2	G3	G4	
HR01(P)	2/10	0/10	0/10	1/10	1/30	0.59
HR02(P)	0/10	0/10	0/10	1/10	1/30	
HR03(P)	0/10	0/10	0/10	1/10	1/30	
HR04(P)	0/10	0/10	0/10	0/10	0/30	
HR05(P)	2/10	1/10	1/10	1/10	3/30	
HR06(P)	1/10	0/10	0/10	0/10	0/30	
HR07(P)	3/10	0/10	3/10	2/10	5/30	
HR08(P)	5/10	0/10	6/10	7/10	13/30	
HR09(P)	0/10	1/10	0/10	0/10	1/30	
HR10(P)	1/10	0/10	0/10	0/10	0/30	
合計	14/100				25/300	

## 6.1.4 グラウトの施工手順を考慮した処分孔湧水の評価

### (1) 検討内容

グラウトの施工手順を考慮した処分孔湧水の評価は、H27年度の検討をより現実的な設定とするためにグラウトのモデル化方法を改良すると共に、止水対策(グラウト)実施後に想定される他の処分孔への地下水の周り込みを加味した施工を模擬し、その施工に伴う処分孔の湧水量の変化について定常の浸透流解析によって検討した。

### (2) グラウトのモデル化の違いによる比較

#### 1) グラウトのモデル化

平成 27 年度の検討において作成した複数坑道モデルを用いて、グラウトによる止水対策のモデル化方法を検討した。止水対策のモデル化にあたっては、一定の湧水量を超過した処分孔周辺へのグラウト注入を想定し、透水性の変化に対応して、昨年度とは異なるモデル化手法に取り組んだ。平成 27 年度の検討では、止水対策による改良領域のパイプの透水係数をすべて一定の割合で低下させることによりグラウトの改良効果を表現した。この場合、湧水量の多寡にかかわらず一律に透水係数を下げることとした(図 6.1.4-1)。これに対し、今年度のモデル化では、実際のグラウト施工状況に近い改良効果を表現するため、止水対策領域の透水係数を所定の透水性(1Lu相当)に低下させることで、グラウトの改良効果を表現するものとした(図 6.1.4-2)。なお、本検討には、平成 27 年度の単一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 HR08 モデルを使用した。

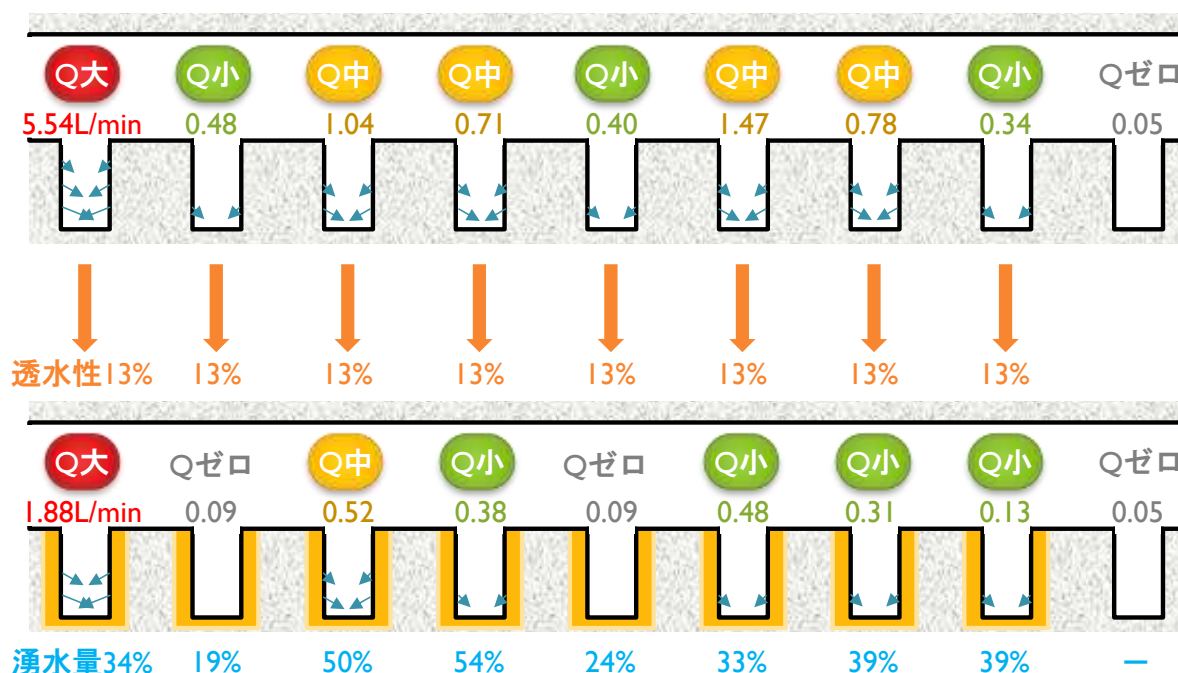


図 6.1.4-1 処分孔周辺へのグラウトのイメージ図 (平成 27 年度)

※H27のR08モデル

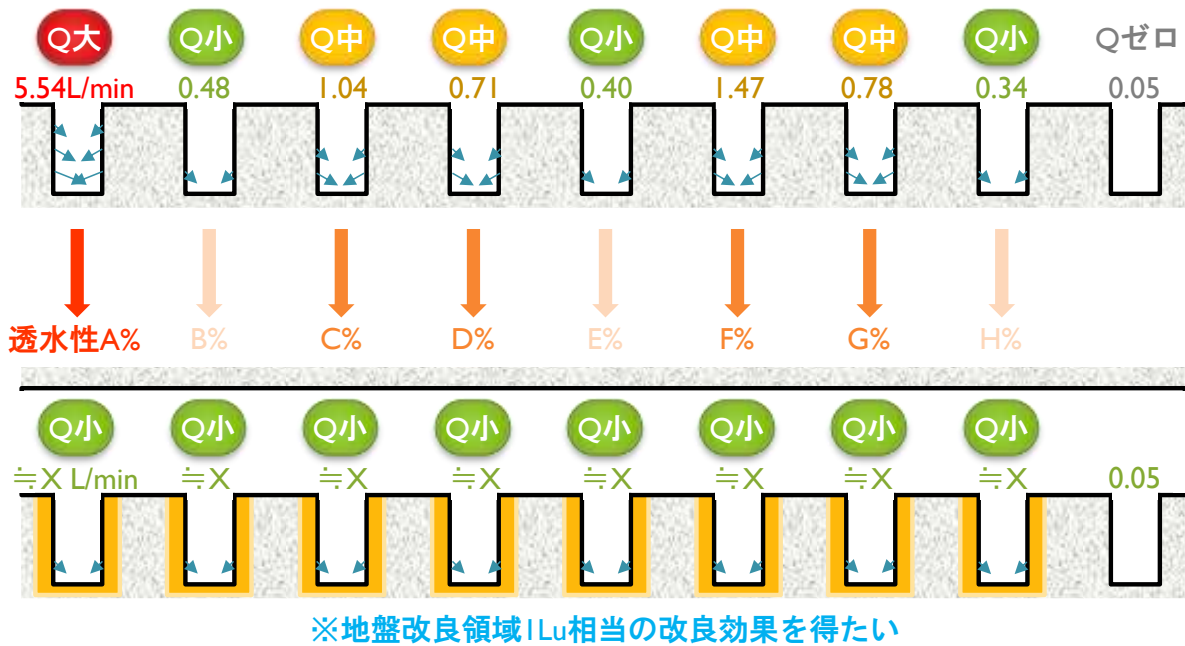


図 6.1.4-2 処分孔周辺へのグラウトのイメージ図 (平成 28 年度)

グラウト改良範囲は、平成 27 年度の検討と同様に処分孔壁面から 1.5m の範囲とした。具体的には、図 6.1.4-3 に示すように、処分孔として設定した半径 1.5m、処分坑道底盤から 5.0m の範囲より外側の、半径 3.0m、処分坑道底盤から 6.5m 範囲までの領域を通過するパイプの透水係数を低下させるものとした。この時、処分孔と交差する EDZ のパイプも同様に扱うこととした。グラウトの改良範囲は、グラウトが浸透した割れ目から交差した割れ目へ浸透することによりさらに広がる可能性があるが、本モデル化においてはこのような 2 次浸透は考慮しないこととした。

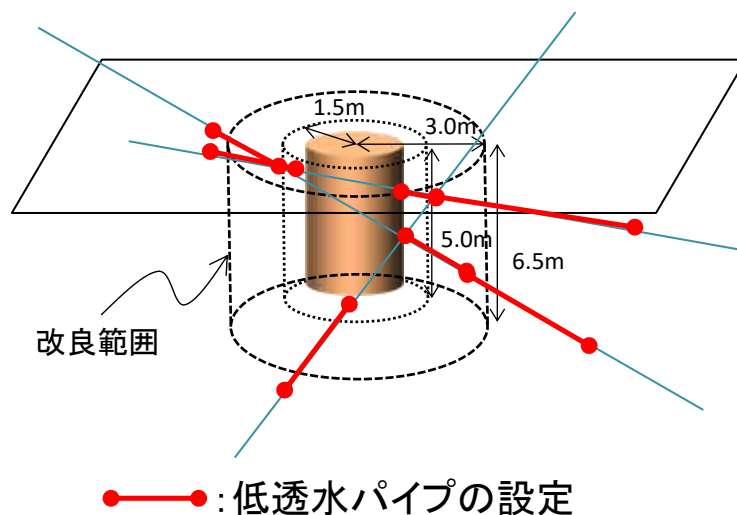


図 6.1.4-3 処分孔周辺へのグラウトの設定方法

本年度のモデル化では、処分孔単位で 1Lu 相当の透水性を表現するため、まず、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、以下の式で示す、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考えた(図 6.1.4-4)。

$$Q_p = \sum_{i=1}^N k_i A_i$$

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示す。表 6.1.4-1 に示すように、算定した $Q_p$ 値は $4.1 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-4} (\text{m}^3/\text{sec})$ と処分孔によってばらつきが見られた。それでも、図 6.1.4-5 の $Q_p$ 値と処分孔湧水量との関係に示すように、流量の増加に伴って処分孔流量は増加しており、概ね正の相関があることを確認した。

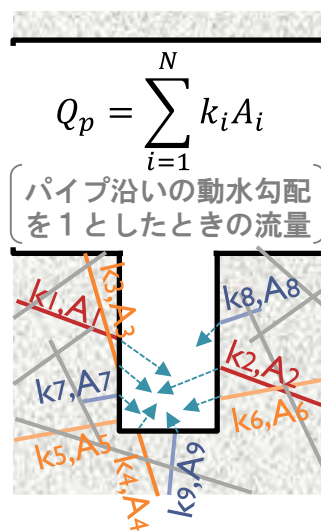


図 6.1.4-4 処分孔周りの透水性のイメージ

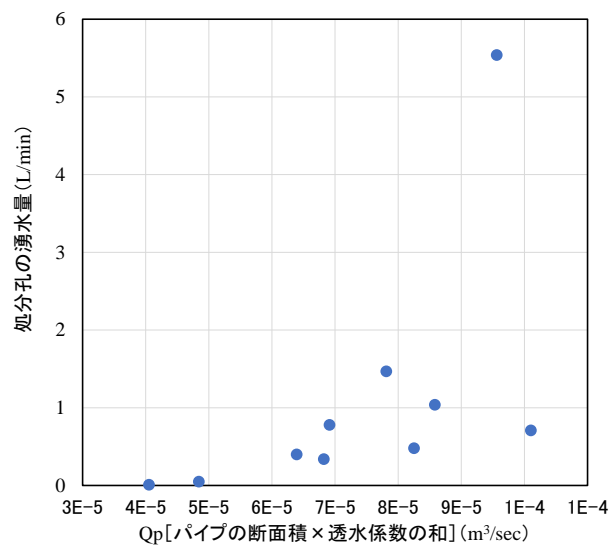


図 6.1.4-5 処分孔を交差するパイプの合計流量と処分孔湧水量の関係

表 6.1.4-1 処分孔と交差するパイプの合計湧水量

処分孔	Q <sub>p</sub> [m <sup>3</sup> /sec]	低減係数 α	処分孔湧水量 [L/min]
01	9.6E-05	7.6%	1.27
02	8.3E-05	8.8%	0.07
03	8.6E-05	8.4%	0.40
04	1.0E-04	7.2%	0.35
05	6.4E-05	11.3%	0.09
06	7.8E-05	9.3%	0.37
07	6.9E-05	10.5%	0.27
08	6.8E-05	10.6%	0.12
09	4.8E-05	14.9%	0.05
10	4.1E-05	17.9%	0.01
算術平均	7.3E-05	10.6%	0.30

上記の手順で求めた処分孔に交差するパイプの流量をもとに、グラウト改良範囲が 1Lu（透水係数  $1.333 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ ）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。低減率は以下の式に基づき定義した。

$$\alpha_p = \frac{S_p k_g}{Q_p}$$

ただし、 $S_p$  は処分孔の表面積 ( $S_p = 17.25\pi \text{ m}^2$ )、 $k_g$  はグラウト後の透水係数 ( $k_g = 1.333 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ ) を表している。低減率算定結果を表 6.1.4-1 に示した。処分孔 10 個の平均低減率は 10.6% で、平成 27 年度設定した 13% と近い値となった。また、処分孔ごとに低減率が異なり、平成 27 年度と比較して、処分孔湧水量の多かった処分孔 01 や処分孔 03 では特に低減率が低く、湧水量の少なかった処分孔 09 や処分孔 10 では低減率が高い結果となった。

## 2) 湧水量の比較

1) で設定したグラウトのモデル化手法を用いて、モデル化手法の違いによる止水対策後の処分孔湧水量を比較した。平成 27 年度の検討で実施した 0.1L/min 以上の処分孔に止水対策を実施したケースと、今回実施したモデル化での計算結果を合わせて表 6.1.4-2 に示した。太字で示しているのが止水対策を行った処分孔であり、赤く色付けされた箇所は止水対策後においても湧水量が 0.5L/min を超えている処分孔を示している。

止水対策実施後の処分孔の湧水量は、すべての処分孔で減少した。また平成 27 年度モデルの結果と比較すると、止水対策後の全処分孔湧水量は平均 0.39L/min だったのに対して、今年度モデルでは 0.30L/min であり同程度であった。両モデルの差が明瞭となった箇所として、初期の湧水量が最も多かった処分孔 01 では、今年度モデルでの湧水量は、平成 27 年度モデルでの湧水量の 3 分の 2 程度 (68%) となった。

以上より、処分孔近傍の改良範囲の透水性を 1Lu 相当に下げることにより、該当箇所の処分孔湧水量が低減したことから、改良効果を表現することができた。また、各処分孔周りの透水性をグラウト施工後 1Lu 相当になるように低減率を設定することで、透水係数を一律 13% に下げる方



法よりも、特に湧水量が多い箇所において止水対策による湧水量低減効果が発揮されることが確認された。

表 6.1.4-2 止水対策後の坑道湧水及び処分孔湧水量の比較

処分孔	グラウトなし (L/min)	昨年度 検討 (L/min)	今年度 検討 (L/min)
(坑道)	38.19	37.32	37.41
01	5.54	<b>1.88</b>	<b>1.27</b>
02	0.48	<b>0.09</b>	<b>0.07</b>
03	1.04	<b>0.52</b>	<b>0.40</b>
04	0.71	<b>0.38</b>	<b>0.35</b>
05	0.40	<b>0.09</b>	0.09
06	1.47	<b>0.48</b>	<b>0.37</b>
07	0.78	<b>0.31</b>	<b>0.27</b>
08	0.34	<b>0.13</b>	0.12
09	0.05	0.05	0.05
10	0.01	0.01	0.01
算術平均	1.08	0.39	0.30

※太字は止水対策を行った処分孔  
 ※赤い箇所は、湧水量が 0.5L/min を超える処分孔

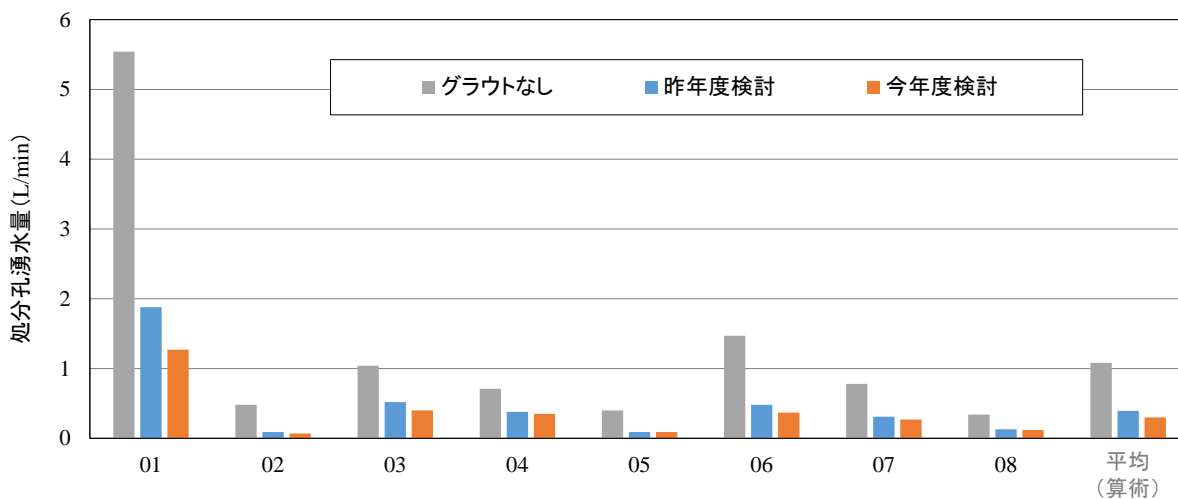


図 6.1.4-6 止水対策後の坑道湧水及び処分孔湧水量の比較



### (3) グラウトの施工順序による比較

#### 1) 施工順序の設定方法

(2)における検討は、グラウト施工をすべての処分孔で同時に行った状態を再現したモデルである。しかしながら、実際の施工ではグラウト注入は処分孔一つずつ順番に実施していくと考えられる。このとき、グラウト施工により止水対策箇所の透水性が低下した影響が、周辺の処分孔に及ぶ可能性がある。そこで、中央の処分坑道にある処分孔のうち、湧水量の多い処分孔から順番にグラウト施工を行った場合の周辺処分孔の湧水量の挙動を評価した。なお、検討対象とする水理地質構造モデルとして、今回の検討で作成した複数坑道モデル (HR01P~HR10P) のうち、最も処分孔掘削完了時の湧水量が多かった HR08P モデルを選定した。

図 6.1.4-7 に解析手順のイメージを示す。HR08P の中央の処分坑道にある 10 本の処分孔の中から、最も湧水量が多かった処分孔から順にグラウトによる止水対策を施し、処分孔湧水量が 0.5L/min 以上の未改良箇所が無くなった時点で解析を終了する手順とした。具体的には、処分孔 01、処分孔 06、処分孔 03、処分孔 02、処分孔 04、処分孔 07 の順番で、合計 6 本の処分孔の改良を行った。それぞれの施工段階を STEP0~STEP6 とした。

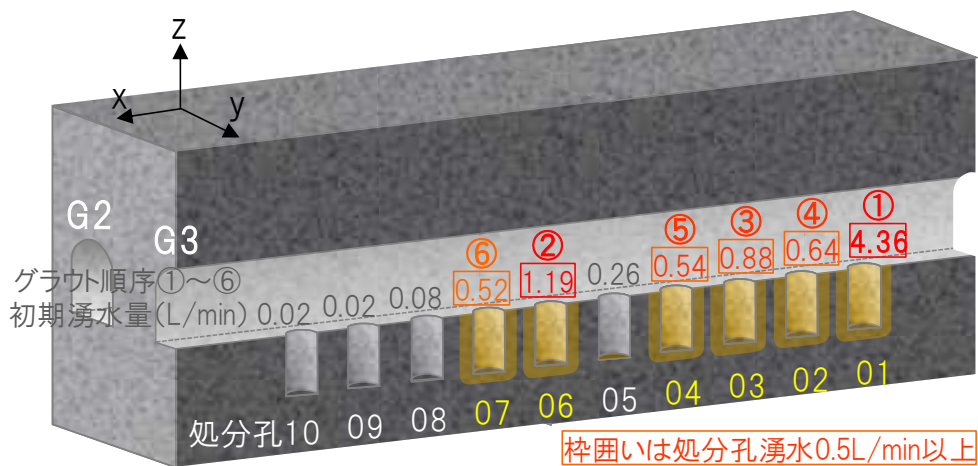


図 6.1.4-7 グラウト施工手順のイメージ

#### 2) 解析結果 (処分坑道湧水量)

グラウト施工の各段階 STEP0~6 における処分坑道の湧水量を表 6.1.4-3 に示した。また、各施工段階における湧水量の変化を表 6.1.4-4 に示した。処分坑道湧水量は、G2 および G4 についてはグラウト施工後の湧水量の変化は、G2 で最大 3.3% (0.14L/min)、G4 で最大 0.9% (0.12L/min) であった。また、最終的な湧水量の増減率については、それぞれ 4.4% (最終増減量: 0.19L/min)、2.5% (最終増減量: 0.34L/min) の増加となった。一方で G3 については、グラウト施工後の湧水量の変化は、最大 5.6% (1.2L/min) と周辺坑道に比べ大きい値となった。また G2 や G4 とは異なり、最終的な湧水量の変化は 7.7% (最終増減量: 1.64L/min) の減少となった。各施工段階後の処分坑道湧水量の変化を図 6.1.4-8 に示す。G2 および G4 については、変化が小さいもののグラウト施工を行うことにより湧水量は増加傾向を示している。一方で G3 に関しては、2 回目の施工である処分孔 06 の止水対策までは湧水量が増加し、その後減少傾向を示した。

表 6.1.4-3 グラウト施工の各段階における坑道湧水量

HR08	各施工段階の湧水量(L/min)							最終増減量
	STEP0	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4	STEP5	STEP6	
G1坑道	1.47	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.49	0.02
G2坑道	4.24	4.38	4.40	4.46	4.41	4.42	4.43	0.19
G3坑道	21.20	21.33	21.63	20.43	19.91	19.55	19.56	-1.64
G4坑道	13.31	13.43	13.46	13.57	13.58	13.60	13.65	0.34
G5坑道	9.68	9.70	9.70	9.72	9.73	9.73	9.73	0.05
処分坑道合計	49.91	50.31	50.67	49.66	49.10	48.79	48.86	-1.05

表 6.1.4-4 グラウト施工の各段階における坑道湧水量の変化率

ひとつ前の解析ステップにおける湧水量を100%とした場合の変化率

HR08	各施工段階での変化(%)							最終増減
	STEP0	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4	STEP5	STEP6	
G1坑道	-	100.5	100.1	100.1	100.0	100.2	100.2	101.1
G2坑道	-	103.3	100.4	101.3	99.1	100.2	100.2	104.4
G3坑道	-	100.6	101.4	94.4	97.4	98.2	100.0	92.3
G4坑道	-	100.9	100.2	100.8	100.1	100.2	100.4	102.5
G5処分坑道	-	100.2	100.0	100.2	100.0	100.1	100.0	100.5
処分坑道合計	-	100.8	100.7	98.0	98.9	99.4	100.1	97.9

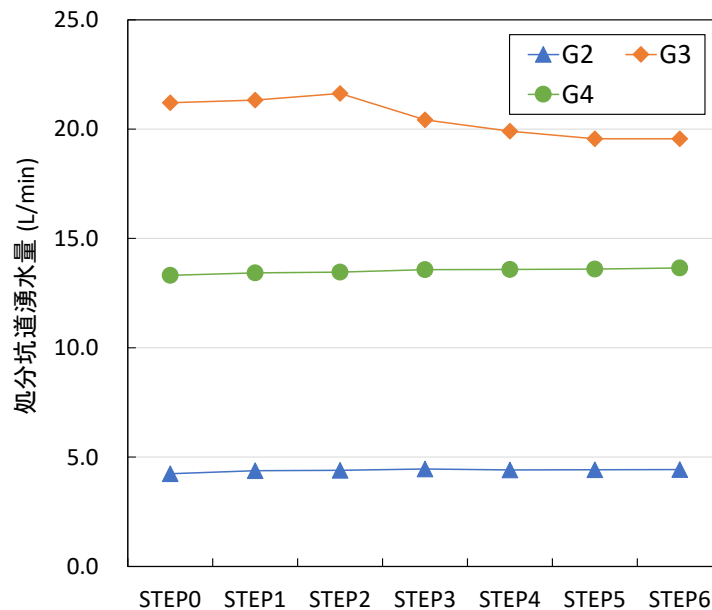


図 6.1.4-8 グラウト止水対策 STEP0～6 の処分坑道湧水量の変化

### 3) 解析結果 (処分孔湧水量)

各施工段階における坑道壁面の湧水量分布を図 6.1.4-9～図 6.1.4-11 に示す。赤枠で囲んだ部分は、各解析ステップにおいてグラウト施工を実施した処分孔を示している。

グラウト施工後の周辺処分孔の湧水量を表 6.1.4-5 に、その変化率を表 6.1.4-6 に示す。ここで、オレンジ色で示されている部分は、各段階においてグラウト施工を実施した処分孔を示している。また各ステップの処分孔毎の湧水量のグラフを図 6.1.4-12～図 6.1.4-15 に示す。処分孔湧水量については、隣接する処分坑道 (G2) では処分孔 02 の施工後に若干湧水量が減少している処分孔が見られるものの、特に目立った湧水量の増減は見られない。

また、奥側の隣接する処分坑道（G4）では、グラウトの施工後に湧水量が減少している処分孔はなく、増加している箇所が多数確認された。特に、表中黄色で示している G4 の処分孔 02 では、一回目（G3 の処分孔 01）のグラウト施工後に、湧水量が 0.49L/min から 0.66L/min と 34.5%増加し、その後のグラウト施工でも増加し続け、最終的に 0.74L/min と当初から 51.3%増加した。これは、グラウト施工を行うことにより、本検討において仮想の基準値としている 0.50L/min 以下であった隣接する処分坑道の処分孔湧水量が増加し、基準値を超えたことを示している。

また、2本の隣接する処分坑道にある合計 20本の処分孔の最終的な湧水量の増減率を見ると、すべての処分孔で湧水量が増加しており、G2の平均で 4.7%、G4の平均で 10.7%の増加となった。これは、中心坑道（G2）の処分孔においてグラウト施工を行い処分孔周りの透水性が低下したため、隣接する処分坑道（G4）やその処分孔に湧水が回り込んだ影響と推測される。

G3における各施工ステップにおける止水対策孔とその周辺孔の湧水量の変化率を図 6.1.4-16 に模式的に示した。止水対策前後で、対策を実施した箇所では湧水量が大幅に減少していることが分かる。また、対策箇所のすぐ脇に隣接する処分孔では、湧水量が減少している箇所と増加している箇所の双方が存在する。ただし、基本的な傾向として湧水量が減少しているエリアの周辺部に湧水量の増加しているエリアが広がっており、湧水の回り込みが発生していることが分かる。隣接する処分孔の湧水の増減は、透水性割れ目の分布の影響を受けていると言える。

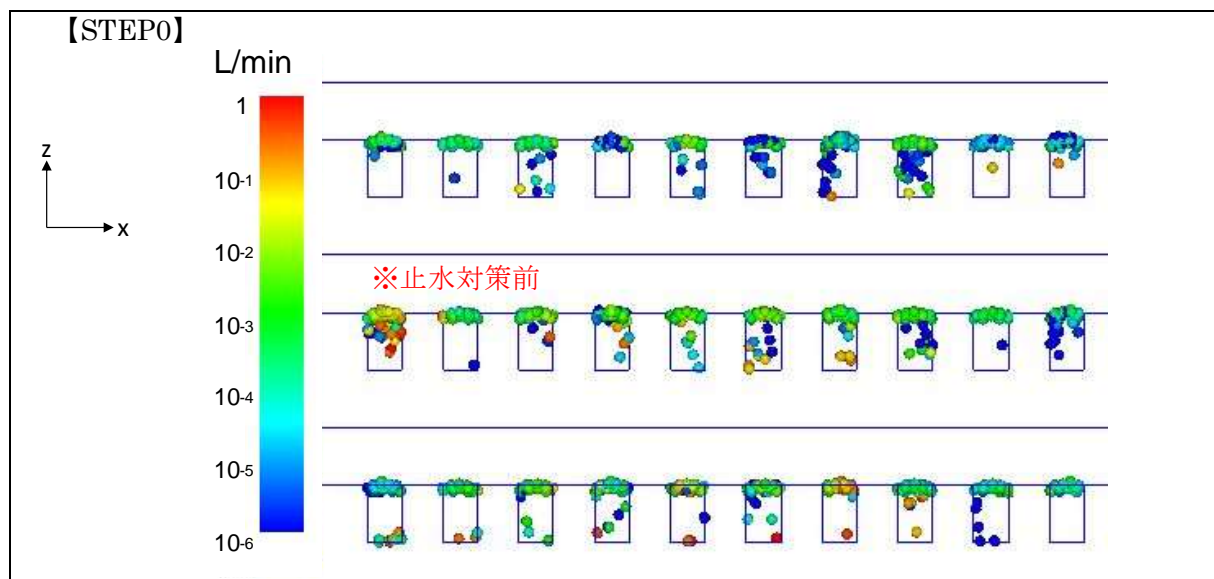


図 6.1.4-9 グラウト止水対策による処分坑道湧水量分布の変化 (STEP0)

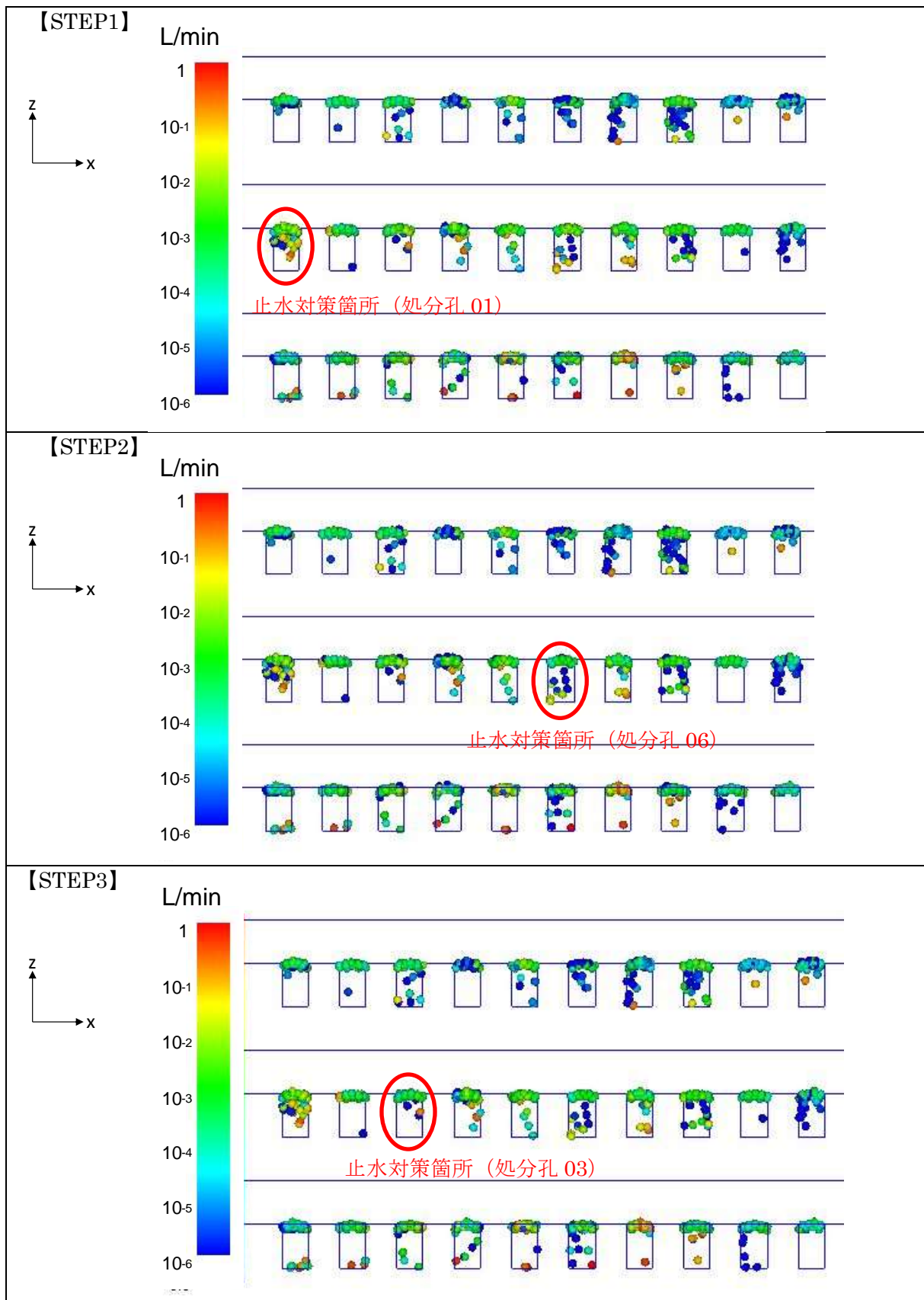


図 6.1.4-10 グラウト止水対策による処分坑道湧水量分布の変化 (STEP1~3)

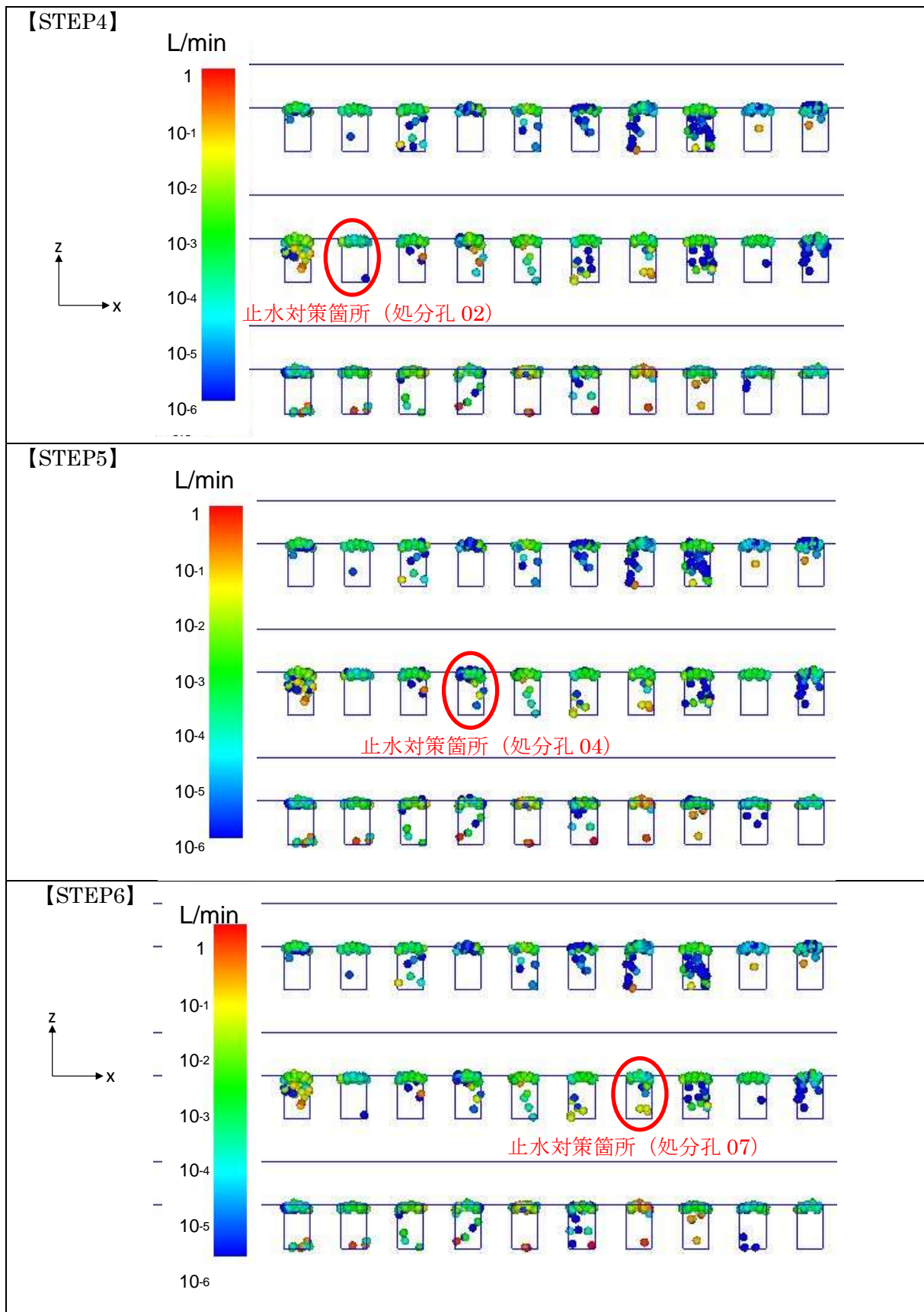


図 6.1.4-11 グラウト止水対策による処分坑道湧水量分布の変化 (STEP4~6)



表 6.1.4-5 各施工段階における処分孔湧水量の変化

HR08P	各施工段階の湧水量(L/m n)							
G2 (-12m)	STEP0	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4	STEP5	STEP6	最終増減量
処分坑道	4.24	4.38	4.40	4.46	4.41	4.42	4.43	0.19
処分孔01	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.00
処分孔02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
処分孔03	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.01
処分孔04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00
処分孔05	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.00
処分孔06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
処分孔07	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.01
処分孔08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.00
処分孔09	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.00
処分孔10	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00
処分孔合計	0.77	0.78	0.78	0.79	0.79	0.80	0.81	0.03
処分孔平均	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.00
G3 (中心坑道)	STEP0	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4	STEP5	STEP6	最終増減量
処分坑道	21.20	21.33	21.63	20.43	19.91	19.55	19.56	-1.64
処分孔01	4.36	0.77	0.77	0.83	0.83	0.83	0.83	-3.52
処分孔02	0.64	0.62	0.62	0.67	0.08	0.08	0.08	-0.56
処分孔03	0.88	0.78	0.78	0.25	0.32	0.28	0.28	-0.60
処分孔04	0.54	0.58	0.58	0.57	0.59	0.20	0.20	-0.34
処分孔05	0.26	0.27	0.30	0.31	0.31	0.30	0.31	0.04
処分孔06	1.19	1.19	0.24	0.24	0.24	0.24	0.29	-0.90
処分孔07	0.52	0.52	0.57	0.57	0.57	0.58	0.17	-0.35
処分孔08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.02
処分孔09	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00
処分孔10	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00
処分孔合計	8.50	4.85	3.99	3.56	3.06	2.64	2.30	-6.20
処分孔平均	0.85	0.48	0.40	0.36	0.31	0.26	0.23	-0.62
G4 (+12m)	STEP0	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4	STEP5	STEP6	最終増減量
処分坑道	13.31	13.43	13.46	13.57	13.58	13.60	13.65	0.34
処分孔01	0.59	0.60	0.60	0.61	0.61	0.62	0.62	0.03
処分孔02	0.49	0.66	0.66	0.72	0.73	0.74	0.74	0.25
処分孔03	0.52	0.54	0.54	0.56	0.57	0.57	0.57	0.05
処分孔04	0.53	0.55	0.55	0.63	0.63	0.64	0.64	0.11
処分孔05	2.59	2.63	2.63	2.70	2.71	2.74	2.74	0.16
処分孔06	2.89	2.90	2.92	2.94	2.94	2.95	2.97	0.08
処分孔07	2.92	2.93	2.94	2.94	2.94	2.94	3.00	0.08
処分孔08	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	0.01
処分孔09	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.01
処分孔10	0.19	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.00
処分孔合計	12.31	12.59	12.64	12.89	12.92	12.98	13.08	0.77
処分孔平均	1.23	1.26	1.26	1.29	1.29	1.30	1.31	0.08
G1坑道	1.47	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.49	0.02
G5坑道	9.68	9.70	9.70	9.72	9.73	9.73	9.73	0.05
処分孔合計	21.59	18.22	17.41	17.24	16.77	16.42	16.19	-5.40
3坑道合計	38.76	39.14	39.49	38.45	37.90	37.58	37.65	-1.11
合計	60.34	57.36	56.90	55.69	54.67	54.00	53.83	-6.51

表 6.1.4-6 各施工段階における処分孔湧水量の変化率

HR08P	各施工段階での変化率(%)							
G2 (-12m)	STEP0	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4	STEP5	STEP6	最終増減率
処分坑道	-	103.3	100.4	101.3	99.1	100.2	100.2	104.4
処分孔01	-	106.6	100.0	103.5	97.5	99.9	100.0	107.6
処分孔02	-	104.9	100.0	103.1	97.8	99.8	100.0	105.5
処分孔03	-	104.3	100.1	101.5	99.7	111.1	100.1	117.6
処分孔04	-	101.2	100.2	100.4	99.8	100.4	100.1	102.1
処分孔05	-	100.4	100.5	100.2	99.9	100.0	100.1	101.1
処分孔06	-	100.3	100.3	100.1	100.0	100.1	100.3	101.1
処分孔07	-	100.1	101.0	100.1	100.0	100.1	101.8	103.1
処分孔08	-	100.1	101.7	100.1	100.0	100.0	101.8	103.7
処分孔09	-	100.1	101.2	100.1	100.0	100.0	102.6	104.0
処分孔10	-	100.0	100.4	100.0	100.0	100.0	101.1	101.6
処分孔合計	-	101.1	100.7	100.5	99.7	101.3	101.1	104.5
G3 (中心坑道)	STEP0	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4	STEP5	STEP6	最終増減率
処分坑道	-	100.6	101.4	94.4	97.4	98.2	100.0	92.3
処分孔01	-	17.6	100.1	108.1	99.8	100.6	100.1	19.1
処分孔02	-	97.5	100.0	107.1	11.6	99.9	100.0	12.2
処分孔03	-	88.6	100.2	31.9	129.4	87.1	100.1	31.9
処分孔04	-	106.7	100.4	97.7	103.0	34.8	100.0	37.4
処分孔05	-	101.2	112.9	101.3	100.0	98.6	101.9	116.2
処分孔06	-	100.7	19.9	100.9	100.0	100.5	120.1	24.4
処分孔07	-	100.4	110.2	100.5	100.0	100.3	29.8	33.2
処分孔08	-	100.1	104.6	100.2	100.0	100.1	117.9	123.8
処分孔09	-	100.0	100.4	100.0	100.0	100.0	101.4	101.9
処分孔10	-	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.3	100.3
処分孔合計	-	57.0	82.2	89.2	85.9	86.3	87.3	27.1
G4 (+12m)	STEP0	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4	STEP5	STEP6	最終増減率
処分坑道	-	100.9	100.2	100.8	100.1	100.2	100.4	102.5
処分孔01	-	102.5	100.1	101.7	100.1	100.4	100.0	105.0
処分孔02	-	134.5	100.2	108.8	102.0	101.1	100.1	151.3
処分孔03	-	103.5	100.1	104.3	100.5	100.6	100.1	109.2
処分孔04	-	104.6	100.3	113.2	101.1	101.1	100.1	121.6
処分孔05	-	101.6	100.3	102.6	100.1	101.2	100.1	106.1
処分孔06	-	100.4	100.7	100.6	100.0	100.2	100.7	102.6
処分孔07	-	100.0	100.5	100.1	100.0	100.0	102.0	102.6
処分孔08	-	100.0	100.1	100.0	100.0	100.0	100.4	100.5
処分孔09	-	100.0	100.5	100.0	100.0	100.0	107.1	107.7
処分孔10	-	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.2	100.2
処分孔合計	-	102.3	100.4	102.0	100.2	100.5	100.7	106.2



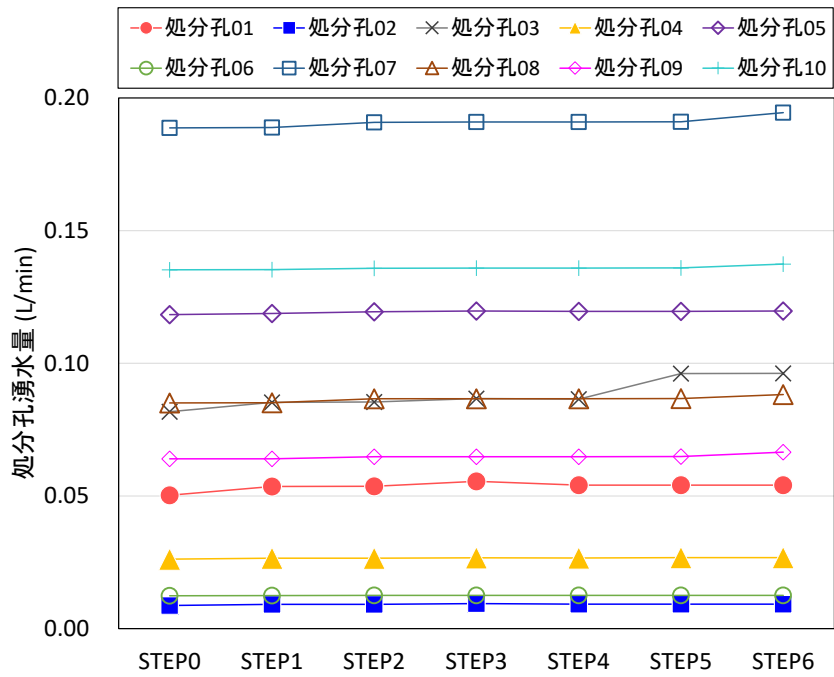


図 6.1.4-12 G2 における各施工段階での処分孔湧水量の変化

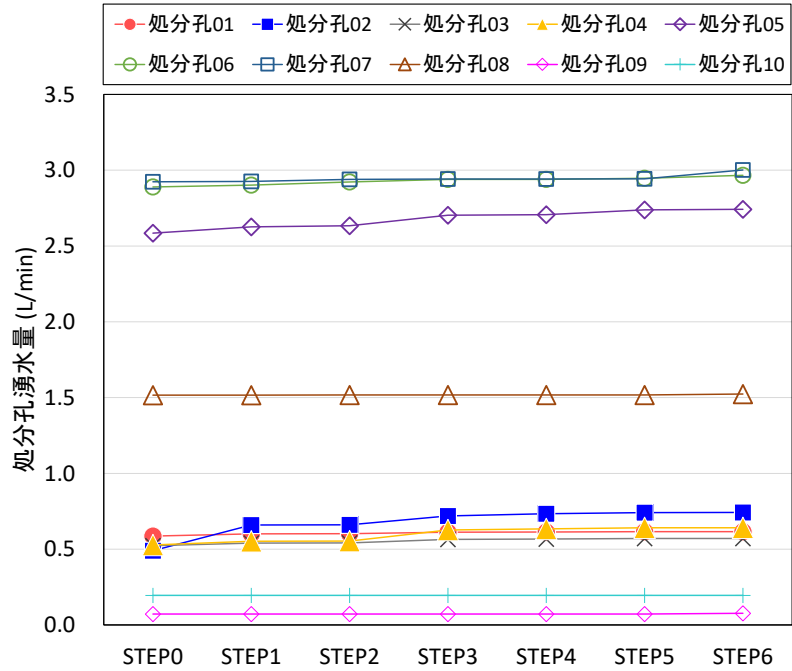


図 6.1.4-13 G4 における各施工段階での処分孔湧水量の変化

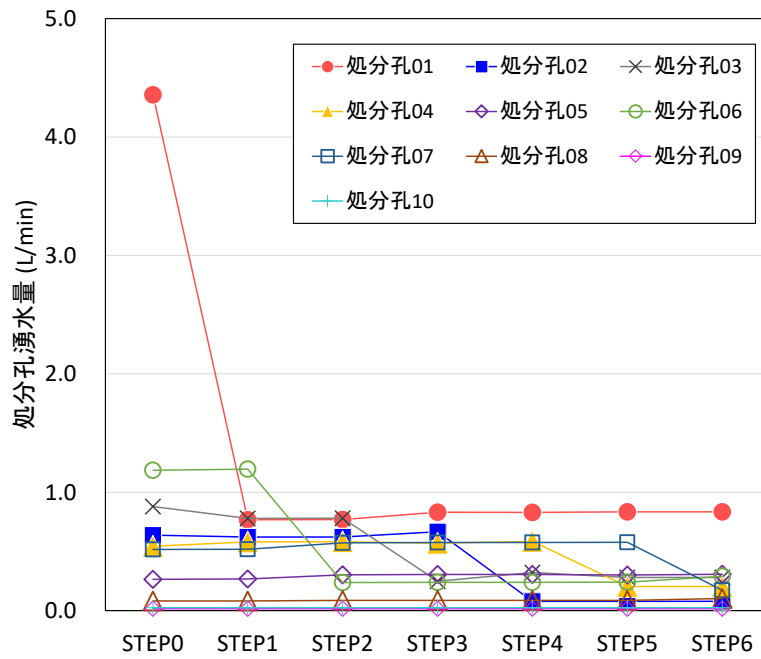


図 6.1.4-14 G3 における各施工段階での処分孔湧水量の変化

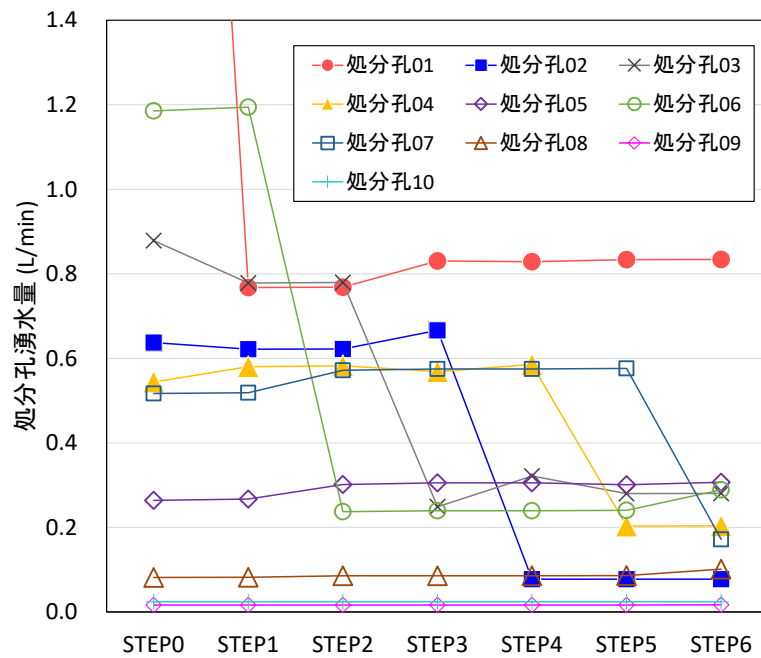


図 6.1.4-15 G3 における各施工段階での処分孔湧水量の変化 (拡大)

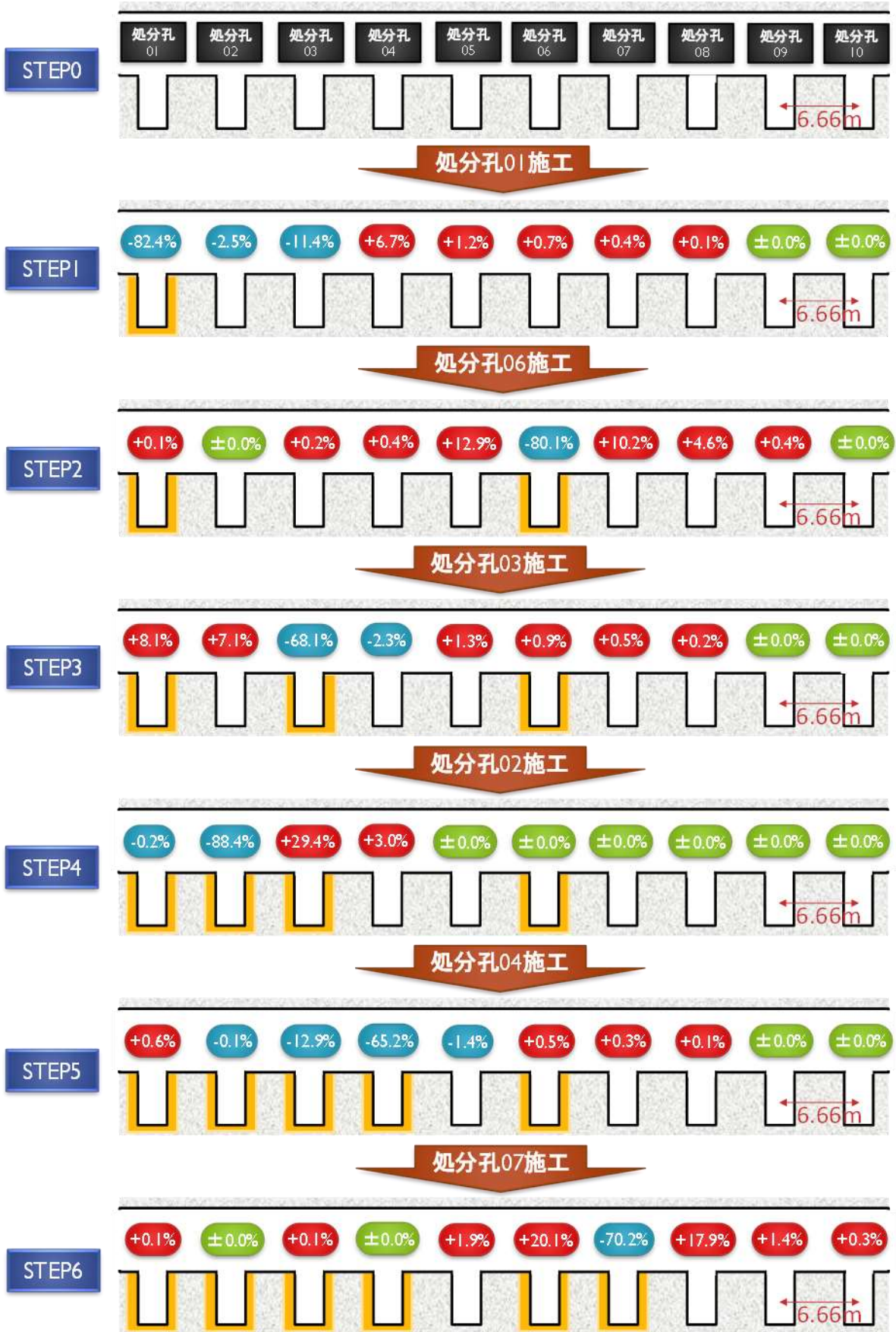


図 6.1.4-16 G3 における止水対策箇所とその周辺の湧水量の変化率

#### 4) 湧水量の変化に関する考察

3)で述べた湧水の回り込みには、図 6.1.4-17 に示す No.17145 の割れ目と No.17147 の割れ目が大きく影響していると考えられる。この 2 つの割れ目は、モデルに含まれる割れ目の中でも特に大きなものである。止水対策前の STEP0 および止水対策後の STEP6 の解析結果から、処分坑道と交差する割れ目のうち湧水量が  $6.0 \times 10^3 \text{L/min}$  以上の流量となっているものを抽出して、それぞれ表 6.1.4-7 および表 6.1.4-8 に示す（その他の解析ステップの結果については、巻末資料 B を参照のこと）。これらの表からも No.17145 と No.17147 の 2 つの割れ目が主要な透水性割れ目であることが確認できる。

このうち No.17145 の割れ目に着目すると、高角度で中央の G3 の処分坑道を縦断するように分布しており、隣接する処分坑道の処分孔とは交差していない。例えば STEP2 で処分孔 06 に止水対策を施した際に、隣接する処分孔 05 や処分孔 07 の湧水が 10%以上増加したのは、この割れ目が大きく影響しており、G3 の処分孔で止水対策を施した際に、同一の処分坑道内で隣接する処分孔への湧水の回り込みに大きく影響を与えている。

一方、No.17147 の割れ目は、比較的高角度である点は No.17145 と同様であるが、走向が処分坑道軸に対して斜めであり、G3 と G4 の処分孔と交差している。中央の処分坑道 G3 で実施した止水対策による湧水量の変化が、図中奥側の G2 坑道で小さく、図中手前の G4 坑道で大きかったのはこの割れ目の影響と考えられる。ただし、図中手前側の隣接する処分坑道（G4）の処分孔のうち、この No.17147 割れ目と交差する処分孔 06・07・08 の湧水量はほとんど増えおらず、この No.17147 と交差する他の割れ目が、湧水量の増加が大きかった処分孔 02 に水を引き込んだと考えられる。ただし、周辺処分孔の湧水増加量はこの処分孔 02 における  $0.25 \text{L/min}$  が最大で、増加率でも 5 割程度であった。

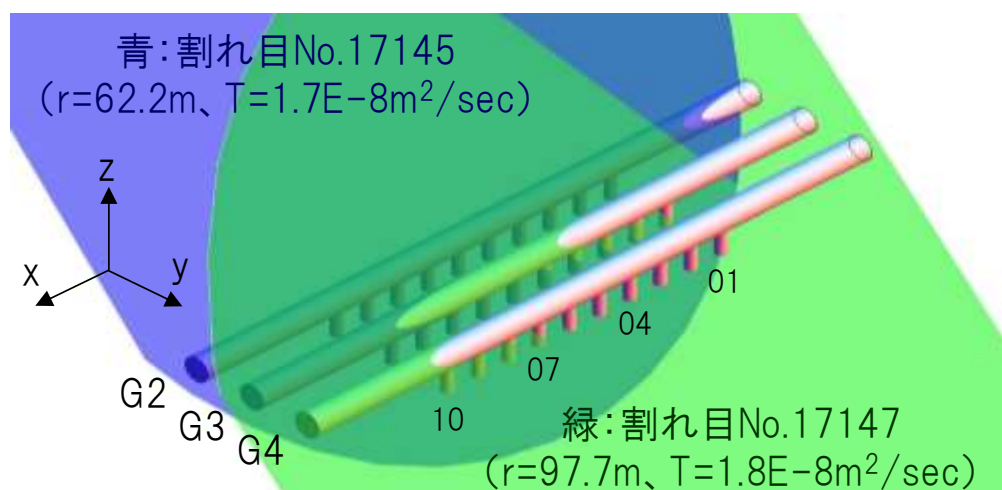


図 6.1.4-17 HR01P モデルにおける湧水量の多い割れ目の分布（再掲）

表 6.1.4-7 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR08P、STEP0)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
17145	8.10E-01	17145	5.12E+00	17147	4.61E+00
17147	2.68E-01	17147	3.40E+00	17143	1.61E+00
17112	2.47E-01	17143	1.38E+00	17141	5.36E-01
17118	1.98E-01	17128	1.25E+00	17098	4.08E-01
16938	1.19E-01	17113	3.52E-01	17128	4.03E-01
17037	9.54E-02	17141	3.30E-01	17074	2.40E-01
17124	8.77E-02	16556	2.85E-01	17047	1.73E-01
16788	7.17E-02	17047	2.50E-01	17126	1.59E-01
17101	6.67E-02	17118	1.93E-01	17084	1.34E-01
17015	5.40E-02	17088	1.77E-01	17061	1.25E-01
16746	4.00E-02	17017	1.65E-01	16206	1.09E-01
16969	3.00E-02	16657	1.23E-01	16946	7.29E-02
16959	2.49E-02	17002	1.14E-01	17017	6.33E-02
16877	2.19E-02	17124	1.08E-01	17038	5.82E-02
17028	1.72E-02	16971	8.53E-02	16429	5.01E-02
16618	1.31E-02	17037	8.14E-02	16811	4.30E-02
13865	1.30E-02	17074	5.55E-02	17035	4.06E-02
16814	9.06E-03	16906	5.01E-02	16556	3.70E-02
16789	8.20E-03	17061	4.50E-02	16949	3.32E-02
16379	7.88E-03	16901	3.67E-02	16922	2.49E-02
17032	6.88E-03	16660	2.96E-02	17088	2.12E-02
16856	6.11E-03	16625	2.64E-02	16996	1.54E-02
16427	4.74E-03	16500	1.92E-02	17002	1.45E-02
17114	3.93E-03	16448	1.78E-02	17113	3.12E-03
16552	3.21E-03	16258	1.78E-02	16767	2.69E-03
16344	2.17E-03	15756	9.20E-03	7334	2.22E-03
16310	1.66E-03	16160	5.96E-03	16546	7.32E-04
16855	1.52E-03	15169	5.06E-03	3352	1.29E-04
9299	8.24E-04	16789	1.75E-03	2829	1.07E-04
10602	2.93E-04	15225	5.43E-04	2589	1.03E-04
11285	7.55E-05	8612	3.12E-04	5035	9.59E-05
16088	7.27E-05	11769	1.46E-04	13994	9.24E-05
13546	6.57E-05	15602	1.01E-04	14334	7.43E-05
14063	6.44E-05	8878	9.85E-05		
		15715	9.01E-05		
		8303	7.34E-05		
		14058	7.28E-05		



表 6.1.4-8 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR08P、STEP6)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
17145	8.29E-01	17145	4.95E+00	17147	4.61E+00
17147	2.77E-01	17147	2.09E+00	17143	1.65E+00
17112	2.50E-01	17143	1.45E+00	17141	5.47E-01
17118	2.23E-01	17128	1.29E+00	17128	4.25E-01
16938	1.23E-01	17141	3.85E-01	17098	4.22E-01
17037	9.91E-02	16556	2.99E-01	17074	2.50E-01
17124	8.84E-02	17113	2.83E-01	17047	1.83E-01
16788	7.22E-02	17088	2.32E-01	17126	1.79E-01
17101	6.74E-02	17017	2.00E-01	17084	1.58E-01
17015	5.82E-02	16657	1.41E-01	17061	1.39E-01
16746	4.26E-02	17002	1.27E-01	16206	1.09E-01
16969	3.21E-02	16971	1.23E-01	16946	7.30E-02
16959	2.54E-02	17061	1.16E-01	17017	6.55E-02
17028	2.24E-02	17124	1.14E-01	17038	6.05E-02
16877	2.20E-02	17047	9.03E-02	16429	5.01E-02
16618	1.46E-02	17118	8.32E-02	16811	4.58E-02
13865	1.45E-02	17074	6.40E-02	17035	4.34E-02
16814	9.65E-03	16906	5.14E-02	16556	3.81E-02
16789	8.75E-03	16901	4.76E-02	16949	3.43E-02
16379	7.98E-03	16660	3.15E-02	16922	2.55E-02
17032	6.95E-03	16625	2.71E-02	17088	2.31E-02
16856	6.17E-03	17037	2.50E-02	16996	1.78E-02
16427	5.19E-03	16258	2.03E-02	17002	1.51E-02
17114	4.01E-03	16448	1.88E-02	17113	3.77E-03
16552	3.42E-03	16160	6.39E-03	16767	3.11E-03
16344	2.21E-03	15169	5.42E-03	7334	2.31E-03
16310	1.71E-03	16500	2.91E-03	16546	7.35E-04
16855	1.54E-03	16789	1.95E-03	3352	1.29E-04
9299	8.31E-04	15756	7.74E-04	2829	1.08E-04
10602	2.96E-04	8612	3.24E-04	2589	1.03E-04
16088	7.64E-05	11769	1.53E-04	13994	1.02E-04
11285	7.62E-05	15602	1.01E-04	5035	9.72E-05
14063	6.98E-05	13933	9.44E-05	14334	7.50E-05
13546	6.64E-05	15715	9.04E-05	7190	6.44E-05
14506	6.24E-05	14058	8.16E-05		
		10625	7.47E-05		
		8303	7.35E-05		
		13715	6.59E-05		
		2943	6.57E-05		
		8127	6.30E-05		
		12285	6.25E-05		
		15045	6.10E-05		



5) 周辺処分孔への湧水の回り込みに関する考察

ここでは、グラウトによる止水対策効果と、周辺処分孔への湧水の回り込みの影響について考察した。表 6.1.4-9 に、各施工段階における止水対策処分孔の湧水減少量と湧水増加量を示す。まず図 6.1.4-18 に、止水対策箇所における処分孔湧水減少量とその他の処分孔における処分孔湧水の増加量を示す。止水対策を行った処分孔湧水は 0.38L/min～3.59L/min（合計 6.45L/min）減少しているのに対して、その周りの処分孔の湧水増加量は、0.08L/min～0.37L/min（合計 1.23L/min）であった。いずれの解析ステップでも減少量に比べ増加量の方が小さく、全体として増加量は減少量の 19%程度であった。このことから、止水対策により減少した湧水は、周辺の処分孔または隣接する処分坑道の処分孔に回り込んで流出するものの、その増加量は減少量に比べて小さい値であることが確認された。

次に、処分孔湧水減少量と中心 3 坑道の処分坑道湧水量の増加を図 6.1.4-19 に示す。中心 3 坑道の全処分坑道および全処分孔の湧水増加量（湧水総増加量）は、各施工段階で 0.11L/min～0.72L/min（合計 2.24L/min）であり、全体として湧水総増加量は減少量の 35%となった。

以上のことから、止水対策を行うことにより減少した処分孔湧水は、周辺の処分孔および処分坑道へ回り込むものの、このうち周辺の処分孔における湧水の増加量は減少量の 2 割程度と小さく、全体としては、止水対策によって湧水低減の効果があることが示された。

表 6.1.4-9 各施工段階における湧水総変化量

HR08	各施工段階での湧水総変化量 (L/min)								減少量に対する増加量の割合 (%)
	STEP0	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4	STEP5	STEP6	合計	
湧水減少量	-	-3.59	-0.96	-0.53	-0.59	-0.38	-0.40	-6.45	
処分孔湧水増加量	-	0.34	0.15	0.37	0.12	0.08	0.17	1.23	19.1
湧水総増加量	-	0.72	0.50	0.54	0.13	0.11	0.24	2.24	34.7

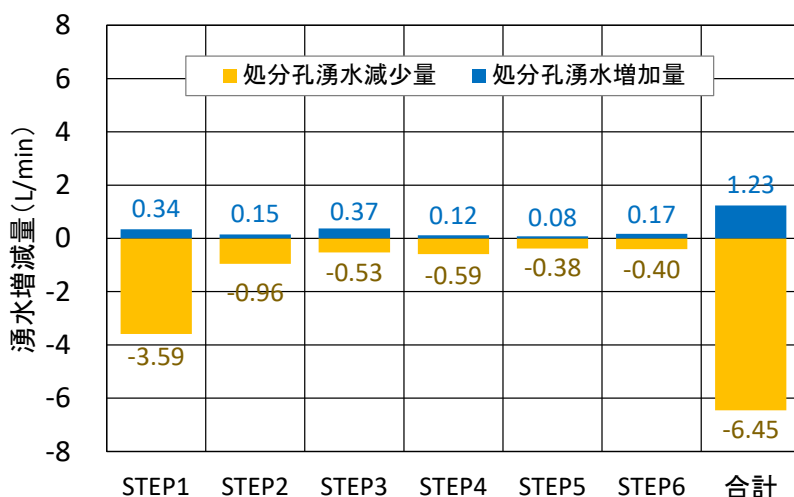


図 6.1.4-18 各施工段階における処分孔湧水減少量と中心 3 坑道の全処分孔湧水増加量



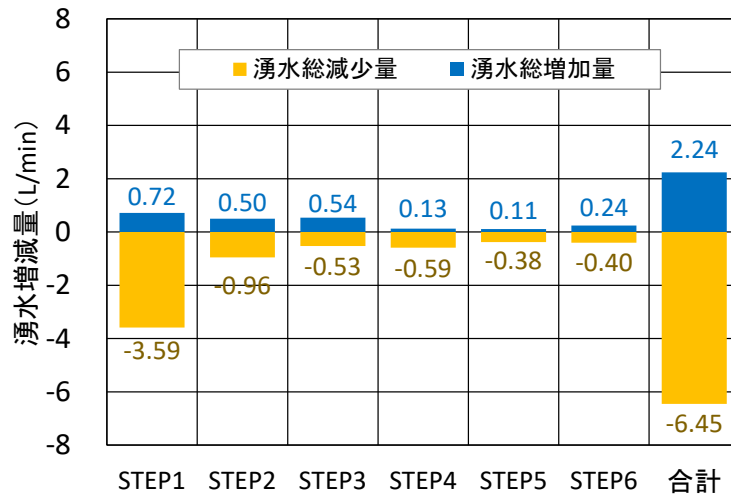


図 6.1.4-19 各施工段階における処分孔湧水減少量と中心 3 坑道の湧水総増加量

(4) 解析結果のまとめ

複数坑道モデルを用いて、グラウトによる止水対策のモデル化方法を検討し、止水対策前後の湧水量分布の解析および評価を行った。

止水対策のモデル化方法の検討では、各処分孔周りの透水性をグラウト施工後 1Lu 相当になるように低減率を設定することで、透水係数を一律に下げた平成 27 年度のモデル化方法よりも止水対策後の処分孔湧水量が平準化できることが確認された。すなわち、湧水量が多い処分孔において、より大きな湧水低減効果が得られるようなモデル化ができた。

その後、この止水対策モデルを用いた浸透流解析を実施し、処分孔や処分坑道への湧水量に与える隣接坑道や処分孔の影響を評価した。なお、検討対象とする水理地質構造モデルとして、今回の検討で作成した複数坑道モデル (HR01P~HR10P) のうち、最も処分孔掘削完了時の湧水量が多かった HR08P モデルを選定した。この結果、図 6.1.4-20 に示すような透水性割れ目の分布に応じた湧水の回り込み現象が確認された。ただし、止水対策による処分孔湧水量の減少量と周辺処分孔の増加量を比較したところ、処分孔湧水の増加量は減少量の約 2 割程度と少なかった。以上のことから、全体としては、止水対策によって湧水低減の効果があることが示された。

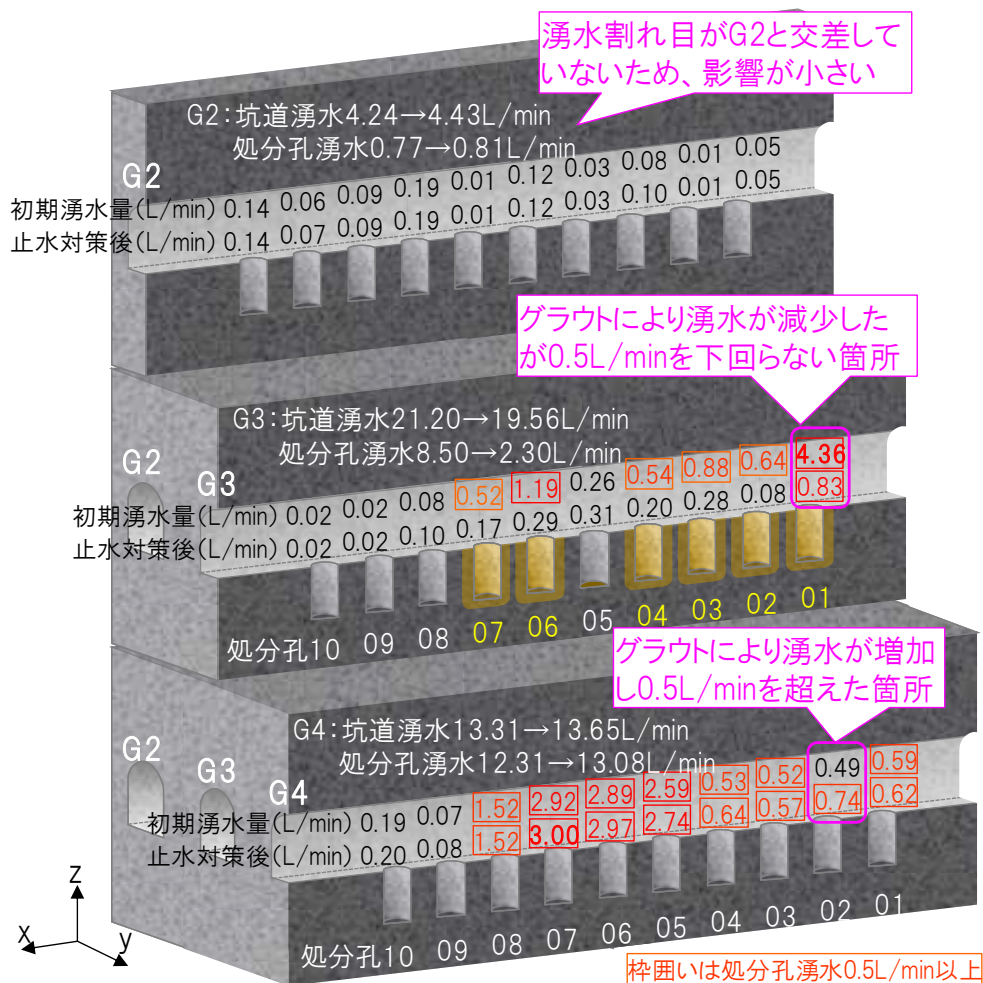


図 6.1.4-20 グラウト施工位置とグラウト施工前後の湧水量のまとめ

### 6.1.5 緩衝材の定置後における処分孔への湧水量の推定

#### (1) 検討方針

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)が生じる可能性があり、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処分孔の湧水量(通過流量)に関する試解析を行った。

#### (2) 緩衝材のモデル化

6.1.3(3)で処分坑道および処分孔掘削を再現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)の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、緩衝材をモデル化した。パイプの透水係数を低下させる割合は、1)で述べたグラウトによる止水対策後の割れ目の透水量係数の設定方法を参考にした。すなわち、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、まず、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。処分坑道掘削後から緩衝材定置までの緩衝材領域のパイプの概念図を図6.1.5-1に示す。また、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、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6.1.5-1に示す。

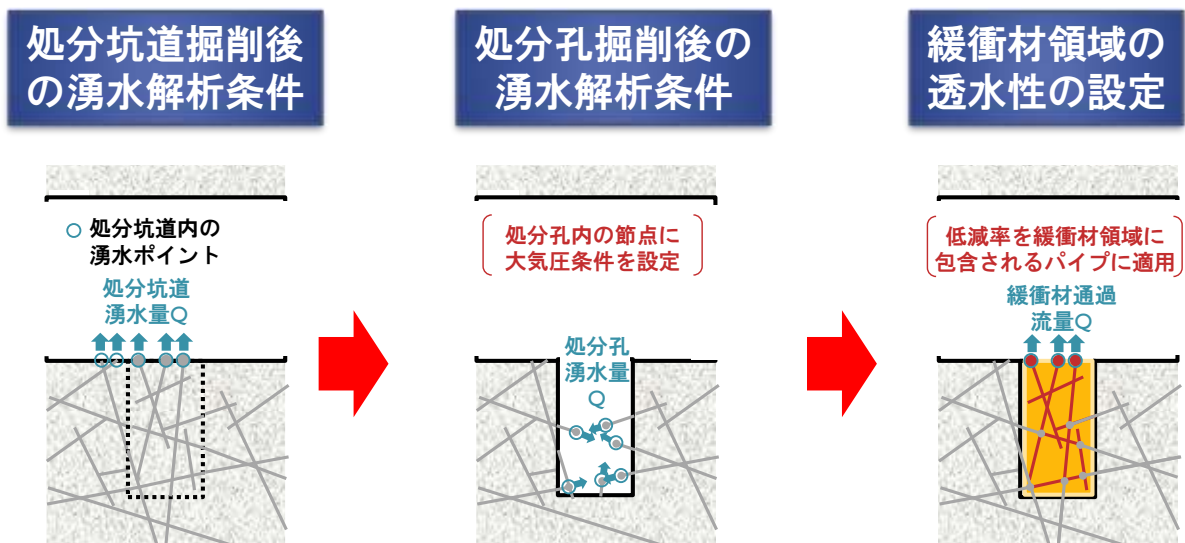


図 6.1.5-1 緩衝材定置のモデル化の概念図

表 6.1.5-1 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 $\alpha$					
		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) 緩衝材通過流量の比較

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処分孔通過流量を表 6.1.5-2 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 6.1.5-2 に示す。緩衝材の透水係数の設定値が、 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/sec} \sim 6.0 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$  については、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、 $6.0 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$  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図 6.1.5-3 に示す。処分孔 01、処分孔 03、処分孔 04、処分孔 05、処分孔 07、処分孔 10 と、処分孔 02、処分孔 06、処分孔 08、処分孔 09 で変化の傾向が大きく異なる。前者は  $6.0 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$  より小さい条件において、処分孔通過流量の変化が小さく、透水係数の変化の影響が小さい。後者は、 $6.0 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$  より小さい条件についても、処分孔通過流量が大きく減少している。前者が透水係数を低減しても処分孔通過流量の変化が小さい原因については、緩衝材に内包するパイプの数が少ない一方で、EDZ や緩衝材の上端付近に極めて近い位置で交差する割れ目の影響によって、透水係数を低減したパイプの影響をほとんど受けなかったためと考えられる。

表 6.1.5-2 緩衝材の透水係数の設定値と処分孔通過流量の関係

HR08P	湧水量 (L/m n)					
	k=1.0E-12	k=1.0E-10	k=6.0E-09	k=1.0E-07	k=1.0E-05	k=1.0E-03
処分坑道	29.91	29.91	29.97	30.29	30.97	31.19
処分孔01	5.7E-01	5.7E-01	5.8E-01	6.3E-01	2.2E+00	4.2E+00
処分孔02	3.6E-07	2.0E-05	1.2E-03	1.8E-02	2.1E-01	1.6E-01
処分孔03	3.9E-02	3.9E-02	4.1E-02	6.5E-02	3.2E-01	5.1E-01
処分孔04	6.0E-02	6.0E-02	6.4E-02	8.9E-02	4.7E-01	6.3E-01
処分孔05	8.1E-03	8.1E-03	8.9E-03	1.3E-02	9.7E-02	2.7E-01
処分孔06	6.7E-07	8.6E-05	4.9E-03	6.6E-02	6.8E-01	8.1E-01
処分孔07	5.7E-02	5.7E-02	5.7E-02	6.0E-02	1.7E-01	2.4E-01
処分孔08	5.8E-07	5.6E-06	3.3E-04	4.9E-03	4.7E-02	5.3E-02
処分孔09	-4.6E-07	-8.0E-08	-1.5E-07	1.3E-06	1.3E-04	5.9E-03
処分孔10	7.9E-03	8.0E-03	8.0E-03	8.4E-03	1.3E-02	1.8E-02
処分孔算術平均	7.5E-02	7.5E-02	7.6E-02	9.5E-02	4.2E-01	6.9E-01

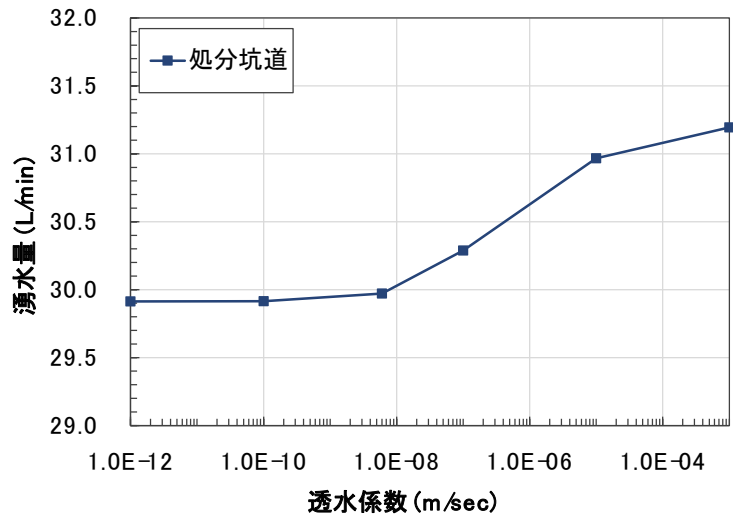


図 6.1.5-2 緩衝材の透水性係数を変化させたときの処分坑道湧水量の変化

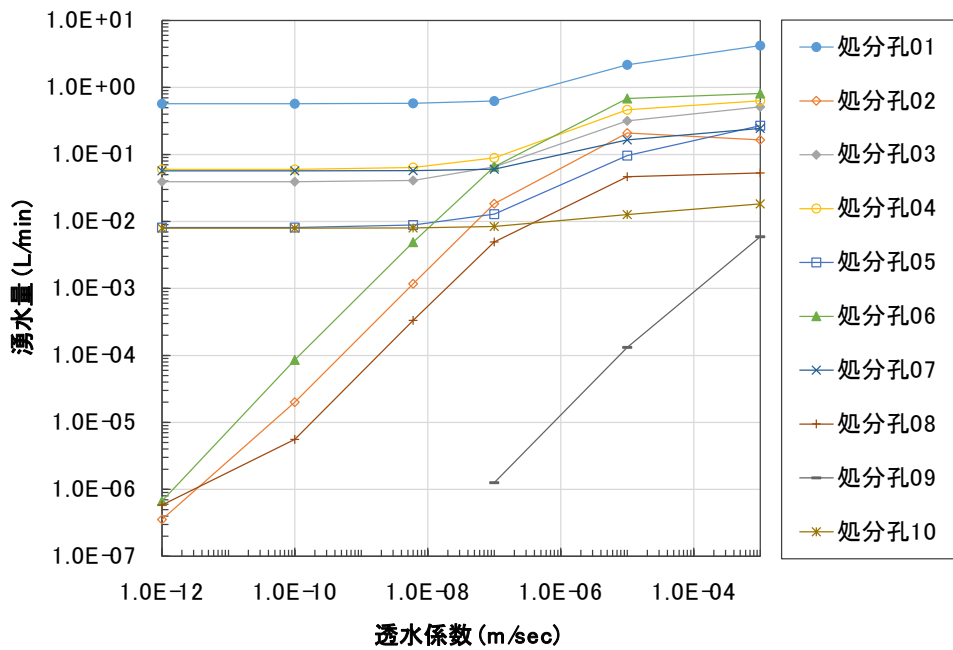


図 6.1.5-3 緩衝材の透水性係数を変化させたときの処分孔通過流量の変化

(4) 緩衝材の圧力分布

図 6.1.5-4 に処分孔 08 の埋戻し後の緩衝材領域における水頭分布を示す。緩衝材の透水性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性係数を小さく設定するほど、内部の水頭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性係数の設定値に対する感度の悪い箇所が発生した。



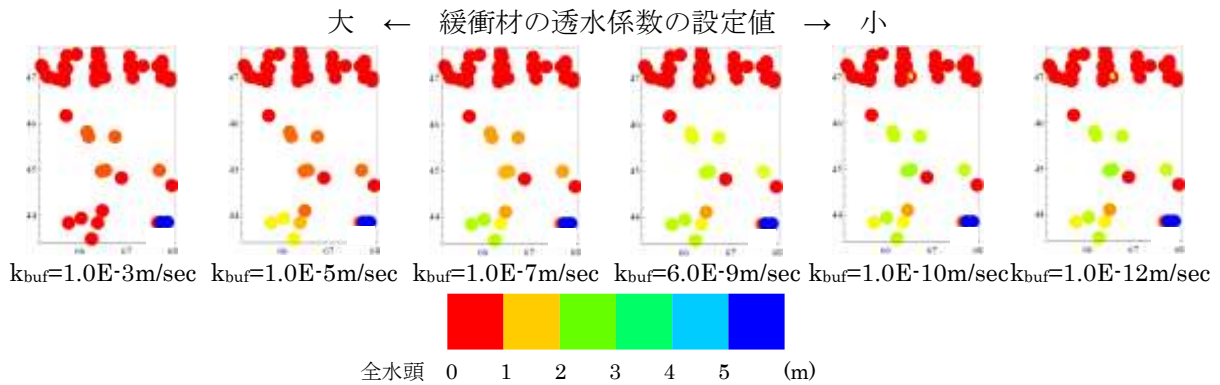


図 6.1.5-4 緩衝材の透水係数を変化させたときの処分孔領域（処分孔 08）の水頭分布

### (5) 課題の整理

本検討は、緩衝材定置の試解析という位置づけで、6.1.3(3)で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行った。以下に本検討における課題を整理する。

まず、現在のモデルでは緩衝材中の水みちをパイプで表現している。割れ目岩盤における水移動は、基質よりも透水性の高い割れ目において支配的であるのに対し、ベントナイトを主材料とする緩衝材には岩盤のような割れ目は存在せず、間隙中の水移動が支配的となる。そのため、緩衝材での水移動は実際には直線的ではなく、より多孔質媒体に近い経路をたどることが考えられる。また、今回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発生させたものであるため、処分孔内に位置するパイプの数は少なく、かつ偏りがある。そのため、本解析では、実現象とは異なる水移動を模擬していることになる。

また、今回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。一方で、緩衝材のモデル化の際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ため、完全には一致してない。

以上の課題に対しては、今後の検討において、緩衝材定置後のモデル化手法を改良し、浸透流挙動等を評価することが望ましい。

## 6.1.6 まとめと今後の課題

### (1) 検討成果のまとめ

本年度は、平成 27 年度までの研究において一般的な地下環境および幌延 URL350m 坑道の公開された水理データに基づいて構築した割れ目ネットワークモデルを用いて、処分場パネルを想定した坑道掘削の進展に伴う湧水量変化の評価を行った。処分場パネルをモデル化するため、複数の処分坑道を設定した割れ目ネットワークモデルを構築し、周辺の処分坑道等が各施工段階で処分孔の湧水量に与える影響を、浸透流解析結果に基づいて評価した。具体的には、以下に示す 4 項目について検討を行った。

- ① 坑道掘削・定置・埋戻しの順序の整理
- ② 複数の処分坑道が処分孔の湧水量に与える影響評価
- ③ グラウトの施工手順を考慮した処分孔湧水量の評価

#### ④ 緩衝材の定置後における処分孔への湧水量の推定

以下では、これらの検討成果をまとめた。

##### ①坑道掘削・定置・埋戻しの順序の整理

坑道掘削・定置・埋戻しの順序の整理として、NUMO より得られる情報等を参考に、操業期間中において緩衝材の品質に影響を与える湧水に関する情報を整理した。前提となる緩衝材の品質に関する情報や、設計オプションおよび地下施設の設計条件等、緩衝材の品質影響の前提となる各種情報についてもまとめ、許容される湧水量については、定置時・定置後それぞれについて考え方をまとめた。このうち、定置時の許容湧水量を湧水貯留槽の容量等によって算定する方法や、定置後の許容湧水量をパイピングによる緩衝材の流出量により算定する方法を示した。さらに、定量的指標としての基準値の具体的な算定方法について、定置時の堅置き方式の許容湧水量 0.62L/min や、定置後の深成岩と新第三紀堆積岩の許容湧水量がそれぞれ 2.8L/min、3.0L/min となることの数的根拠をまとめた。そのうえで、掘削～定置～埋戻しの施工順序が湧水量の変化を与えるに影響を整理し、定置時の湧水量が問題となりやすい堅置き方式に絞って、処分場建設から操業時における施工順序のイメージから、以下の手順を抽出した。

- ・ 処分坑道および処分孔の掘削は処分区画ごとに行われる。
- ・ 処分区画における掘削が一通り完了した後、処分坑道ごとに廃棄体の定置が行われる。
- ・ 廃棄体の定置が完了した処分坑道について順次埋戻しの作業が行われる。

この検討結果より、H27 年度に作成した単一の坑道モデルを複数坑道のモデルに改良することによって、より現実的な検討が可能であると考え、次の②の検討を行った。

##### ②複数の処分坑道が処分孔の湧水に与える影響

複数の処分坑道が処分孔の湧水に与える影響は、実際の処分場パネルを想定し、5本の並行する処分坑道をモデル化し、周辺の処分坑道がモデル中央の処分孔の湧水量に与える影響について、浸透流解析結果に基づいて評価した。

この結果、隣接する処分坑道をモデル化することで処分坑道 1本あたりの湧水量は大幅に減少することが分かった。10リアライゼーションの湧水量の算術平均を比較すると、単一坑道モデルと複数坑道モデルでの湧水量比は 49%であった。また、これと同様に、隣接する処分坑道および処分孔をモデル化することで、湧水量が 0.5L/min を超える処分孔の数も大幅に減少することが分かった。これは、複数坑道をモデル化することによって、湧水箇所が分散したため、処分坑道掘削後の解析結果と整合する。0.5L/min を超える処分孔の割合を単一坑道モデルと複数坑道モデルで比較すると、10リアライゼーションの平均比で 59%に減少する結果が得られた。

以上のことから、複数坑道モデルを使用することで、隣接する処分坑道および処分孔の掘削に伴い掘削部周辺の水頭が低下し、湧水量の低下に与える影響を評価することができた。

##### ③グラウトの施工手順を考慮した処分孔湧水の評価



複数坑道モデルを用いて、グラウトによる止水対策のモデル化方法を検討と、止水対策前後をシミュレートした浸透流解析を行い、湧水量分布の把握および評価を行った。

止水対策のモデル化方法の検討では、各処分孔周りの透水性をグラウト施工後 1Lu 相当になるように低減率を設定することで、透水係数を一律 13%に下げた平成 27 年度のモデル化方法よりも止水対策後の処分孔湧水量が平準化できることが確認された。すなわち、湧水量が多い処分孔においてより大きな湧水低減効果が得られるような、実際の止水対策に近い形でのモデル化を行った。

次に、この止水対策のモデル化方法を用いた浸透流解析を実施し、処分孔や処分坑道への湧水量に与える隣接坑道や処分孔の影響を評価した。この結果、透水性割れ目の分布に応じた湧水の回り込み現象が確認された。ただし、止水対策による処分孔湧水量の減少量と周辺処分孔の増加量を比較したところ、処分孔湧水の増加量は減少量の約 2 割程度と少なかったことから、全体としては、止水対策による湧水量の低減効果が示された。

#### ④緩衝材の定置後における処分孔への湧水量の推定

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)が生じる可能性があり、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処分孔の湧水量(通過流量)に関する解析を行った。

なお、本年は試解析的な位置づけで、緩衝材領域の割れ目ネットワークモデルを構成しているパイプの透水性を、所定の緩衝材の透水係数相当になるよう引き下げる簡易的手法により埋戻しのモデル化を行った。この結果を対象領域の処分孔掘削前の岩盤と比較すると、緩衝材領域の透水係数の設定値の低下に伴い、通過流量が減少するとともに水圧が上昇する現象が確認できた。

#### (2) 今後の検討課題

本年度の検討では、処分坑道・処分孔掘削から止水対策に至る各施工段階に応じた湧水量の変化を、複数坑道モデルを用いて行った。現計画では、その後の緩衝材の定置と定置完了後の処分坑道の埋め戻しについて、図 6.1.6-1 に示すような施工手順が想定されており、処分パネルを想定した場合、隣接する処分坑道では湧水量が増えることが予想される。そこで、処分坑道を含めた埋戻しに伴う隣接坑道及び処分孔の湧水挙動について、本年度作成した複数坑道モデルを用いた浸透流解析結果に基づく評価が有用であると考えられる。

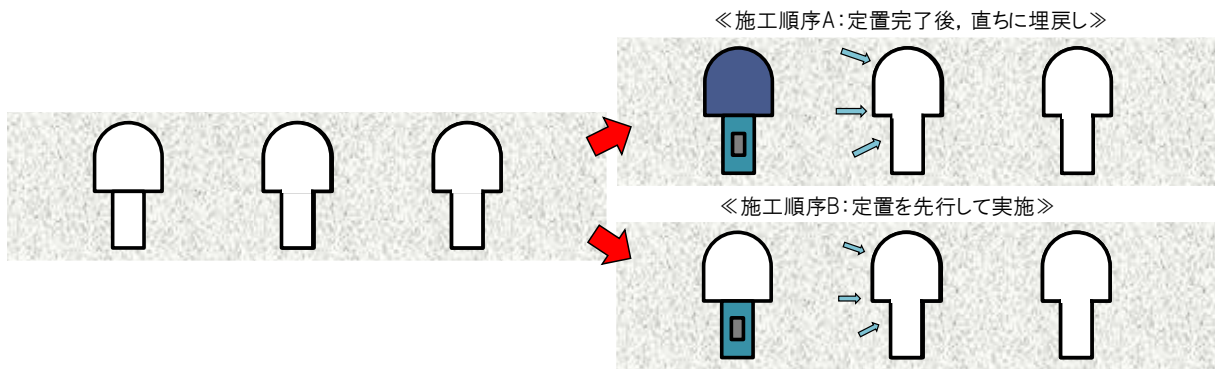


図 6.1.6-1 緩衝材定置～処分坑道埋戻し手順を考慮した湧水量変化の検討

また、定置後の処分孔周辺の地下水流動の評価に関して、に示すように処分孔周辺の EDZ が影響すると考えられる。そこで、処分孔周辺の EDZ のモデル化を行い、定置後の浸透流解析を行うことで、EDZ の透水性に応じた緩衝材内部の通過流量や水圧分布を評価する必要がある。

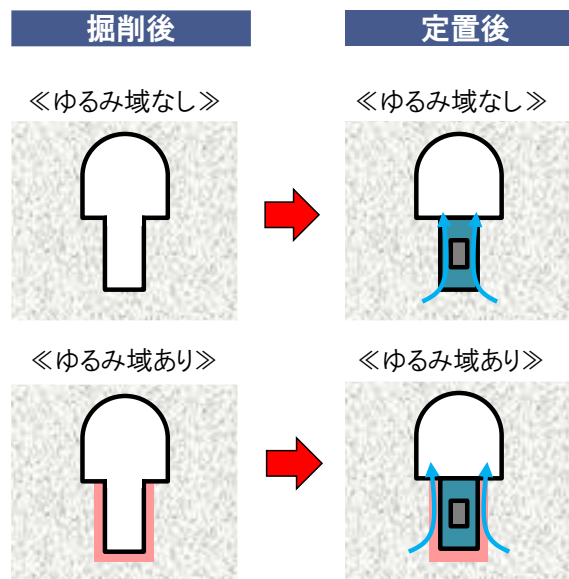


図 6.1.6-2 緩衝材定置後の処分孔の EDZ を考慮した検討

## 6.1 項 参考文献

- [1] 原環センター:2014 年度技術年報、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.

## 6.2 再冠水時の緩衝材の挙動のモデル化の検討

### 6.2.1 緩衝材への地下水浸潤状況の評価に関する検討

#### (1) 工学技術への反映

一次元の地下水浸潤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できる。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化学的な変質挙動が施設閉鎖後の何時から始まるのかを推定できる。また、浸潤状況を把握することによって浸潤が一次的に推移するのか、それとも界面を卓越的に浸潤していくのかが分かることになる。。

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。

#### (2) 解析技術への反映

この試験では、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の、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。

さらに本試験結果は、膨潤性鉱物の不飽和一次元浸潤解析のベンチマーク試験という活用も可能であり、膨潤性鉱物の不飽和一次元浸潤解析が可能な CODE-BRIGHT[14]や DACSAR-UA[15]などの高度化に資する情報となる。今年度は、この結果を用いて、DACSAR での解析手法について検討する。また、連成解析のプラットフォームを持つ、COMSOL を使った試解析も行う。

### 6.2.2 施工品質（密度差）が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響の調査に関する検討

#### (1) 力学に立脚した残留密度差の理論的解釈

##### 1) 概要

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、均質化する傾向が若干見られるものの、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積極的に説明できる理論はこれまでもなか

った。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は難しい。基底間隔を積み重ねた物が膨潤量であっても、境界条件を導入できないからである。このような状況で、暗黙のうちに乾燥密度と膨潤圧、膨潤量は一意の関係にあるという風に考えられてきたことは、力学的な検討が不十分であったためである。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を力学的に解釈すれば、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であろう。当然、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ものである。力学的には、物体の変形は、必ず、浸透膨潤応力を含む力が釣り合う点で止まることも当然である。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ものと考えられる。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解釈することによって残留密度差を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 6.2.2-1 には、Sasakura ら[19]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 3.2.2 項で述べた乾燥密度  $1.8\text{Mg/m}^3$  と  $1.4\text{Mg/m}^3$  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  $\rho_{ben}$  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、

$$\rho_{ben} = \frac{W_b}{V_v + V_b} \quad \text{で示される。}$$

このケースの場合、両者が釣り合うと考えられる密度と現在の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。

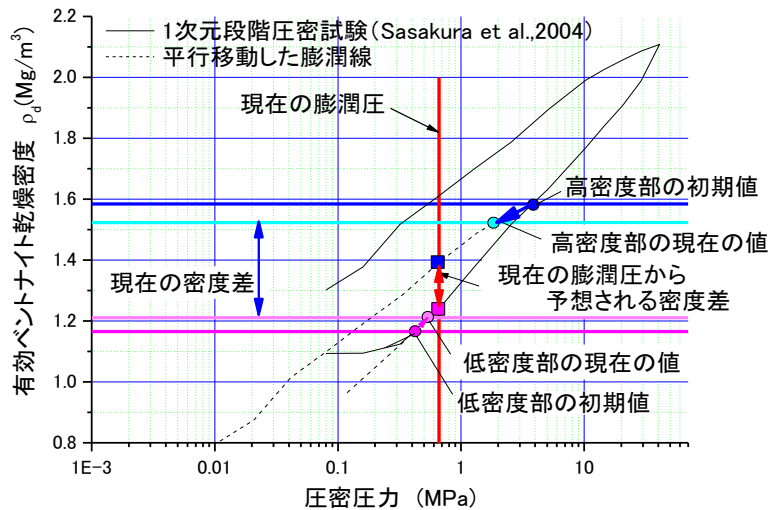


図 6.2.2-1 残留密度分布の力学的解釈(Case1)

図 6.2.2-2 には、Sasakura ら[19]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  $2.0\text{Mg/m}^3$  と  $1.2\text{Mg/m}^3$  のケイ砂 30wt%混合ベントナイトの直列均質化試験（Case2）[20]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  $0.64\text{MPa}$  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約  $0.22\text{Mg/m}^3$  であり、実測が約  $0.25\text{Mg/m}^3$  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 6.2.2-3 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  $0.53\text{MPa}$  である。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必要がある。今年度までに変位がない状態に至ったとみなせるため、試験を終了した。

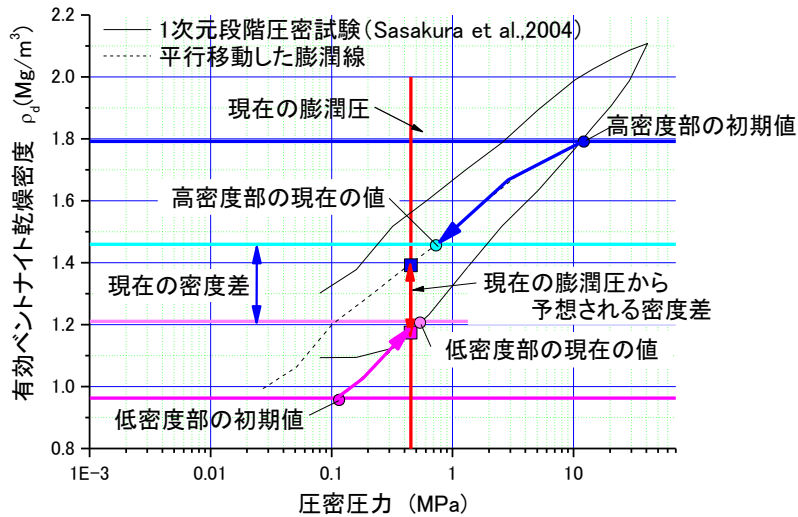


図 6.2.2-2 残留密度分布の力学的解釈(Case2)

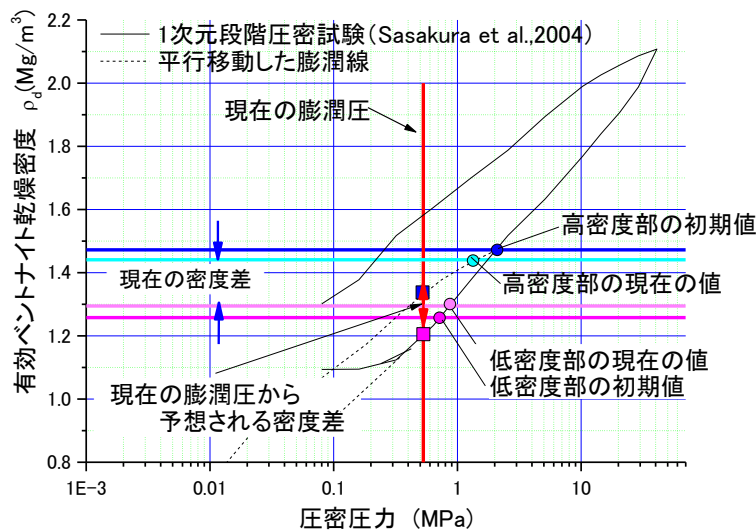


図 6.2.2-3 残留密度分布の力学的解釈(Case3)

図 6.2.2-4 には、Sasakura ら[19]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、3.2.3 で述べた乾燥密度は上下共に  $1.6\text{Mg/m}^3$  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 6.2.2-1 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  $1.6\text{Mg/m}^3$  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●）。現時点では、まだ平衡状態に至っていないため定量的な議論は難しいが、応力点の移動はこの



力学的な解釈と同じ傾向である。

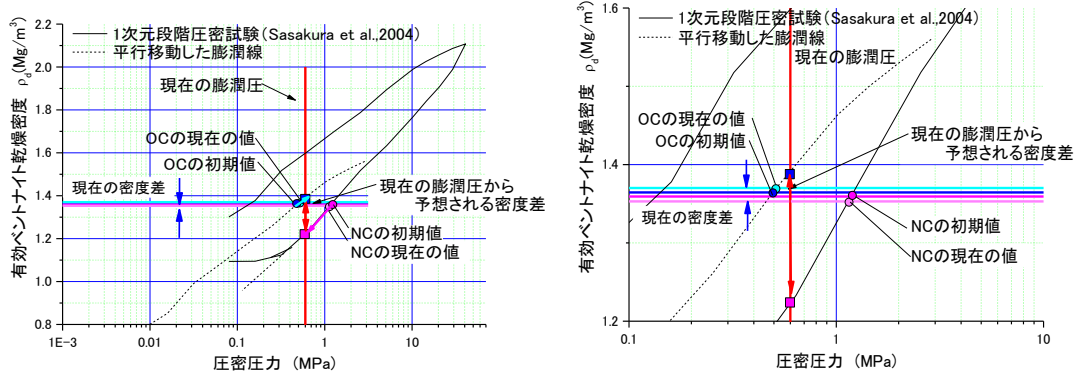


図 6.2.2-4 応力履歴による密度差の発生に関する力学的解釈 (右図：拡大図)

## (2) 工学技術への反映

### 1) 概要

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、応力履歴が緩衝材の均質化に及ぼす影響が定量的に評価されつつある。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 6.2.2-5 に示すような工学技術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 別途、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 この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。

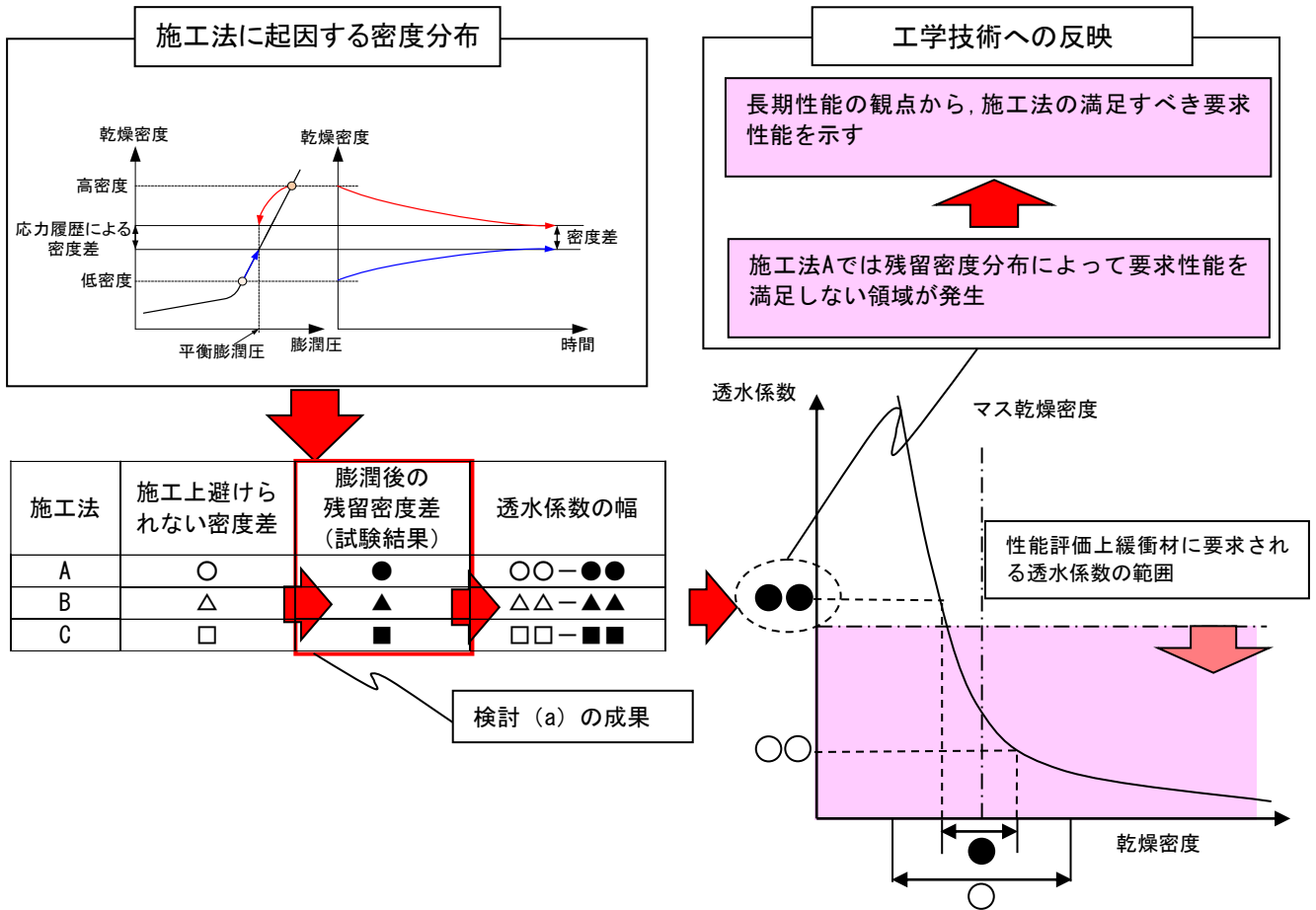


図 6.2.2-5 施工品質が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響の調査のための試験の工学技術への反映イメージ

## 2) 試験結果に基づく密度差の工学技術への反映

表 6.2.2-1 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。

$$k = \frac{1}{5} \frac{\rho_g}{\mu} \frac{1}{Sv^2} \frac{e^3}{1+e} = \frac{1}{5} \frac{\rho_g}{\mu} \frac{1}{\left(\frac{36w^*}{\rho_d}\right)^2} \frac{(\frac{\rho_s}{\rho_d} - 1)^3}{\frac{\rho_s}{\rho_d}}$$

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 $w^*$ [16]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 6.2.2-6 に示すように、既往の研究[17]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 6.2.2-1 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 <sup>3</sup> )	低乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	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 <sup>3</sup> )	低乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	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

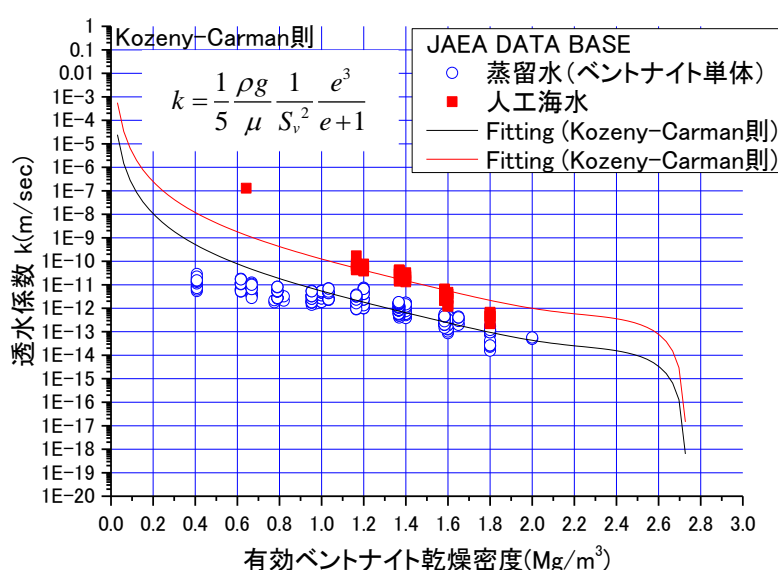


図 6.2.2-6 JAEA DATABASE に対する Kozeny-Carman 則のフィッティング結果

図 6.2.2-7 には、表 6.2.2-1 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/m<sup>3</sup>から 2.0Mg/m<sup>3</sup>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/m<sup>3</sup>から 1.69Mg/m<sup>3</sup>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/m<sup>3</sup>から 1.84Mg/m<sup>3</sup>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<sup>-13</sup>m/s オーダーであるが、NaCl 水溶液のケースでは、10<sup>-11</sup>m/s から 10<sup>-12</sup>m/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<sup>-12</sup>m/s 以下であるとすると、膨潤後の乾燥密度は 1.63Mg/m<sup>3</sup>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/m<sup>3</sup>から 1.75Mg/m<sup>3</sup>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。

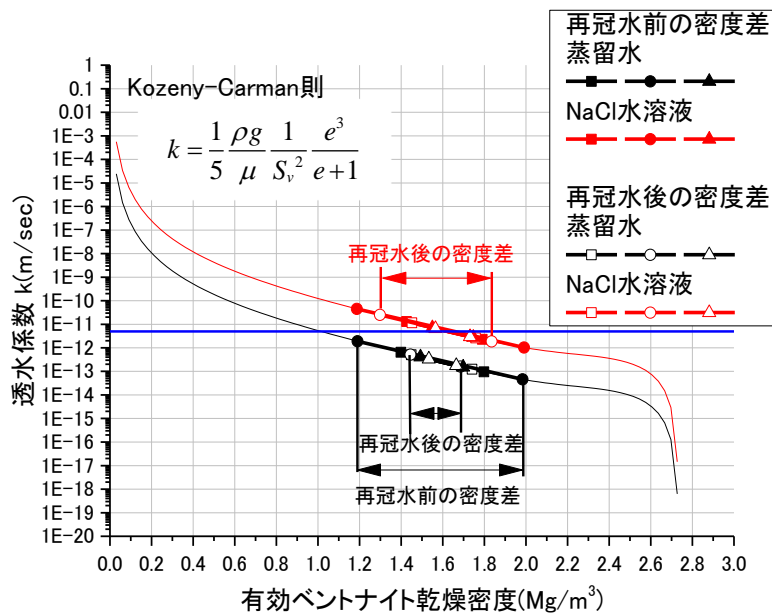


図 6.2.2-7 Kozeny-Carman 則を用いた残留密度差と透水係数の関係

### (3) 解析技術への反映

本検討では、放射性廃棄物地層処分施設の建設作業時における緩衝材の構築後から再冠水終了後までの期間（力学的事象が支配的な状態から化学的事象が支配的な状態への過渡的段階）において緩衝材に発生する事象の定量評価を目的の一つに掲げている。このためには、ベントナイトの膨潤挙動を力学体系の中で説明できなければならない。従来のような現象論的な取り扱いを積み上げても予測能力や説明性を高めることは出来ない。

そこで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、サクショ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 6.2.2-8 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。

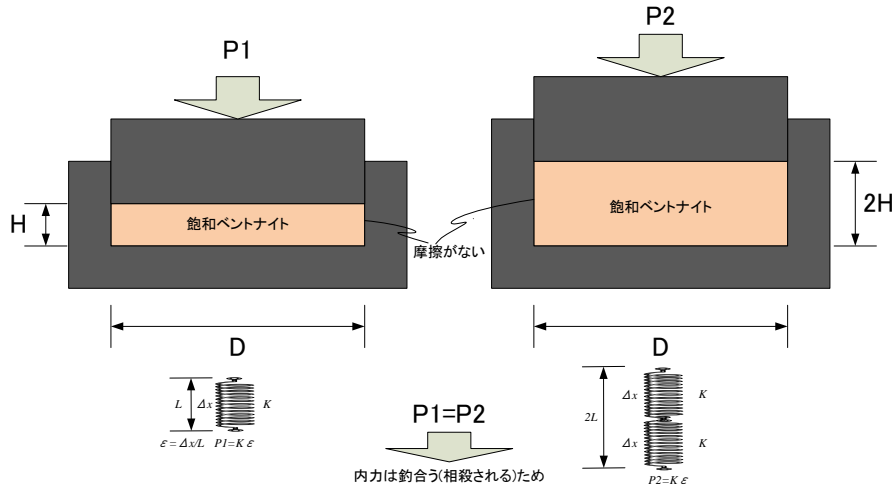


図 6.2.2-8 膨潤圧試験のイメージ

次に、図 6.2.2-9 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 6.2.2-8 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に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 6.2.2-10 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、飽和度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 6.2.2-10 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 6.2.2-10 右）。

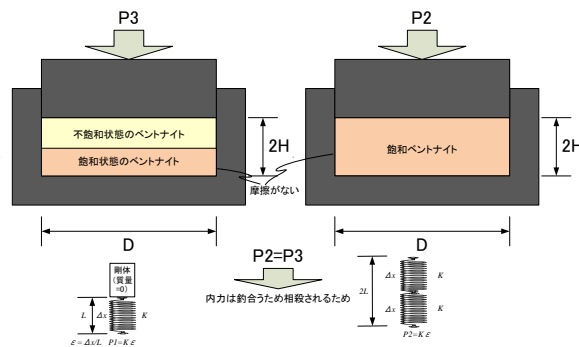
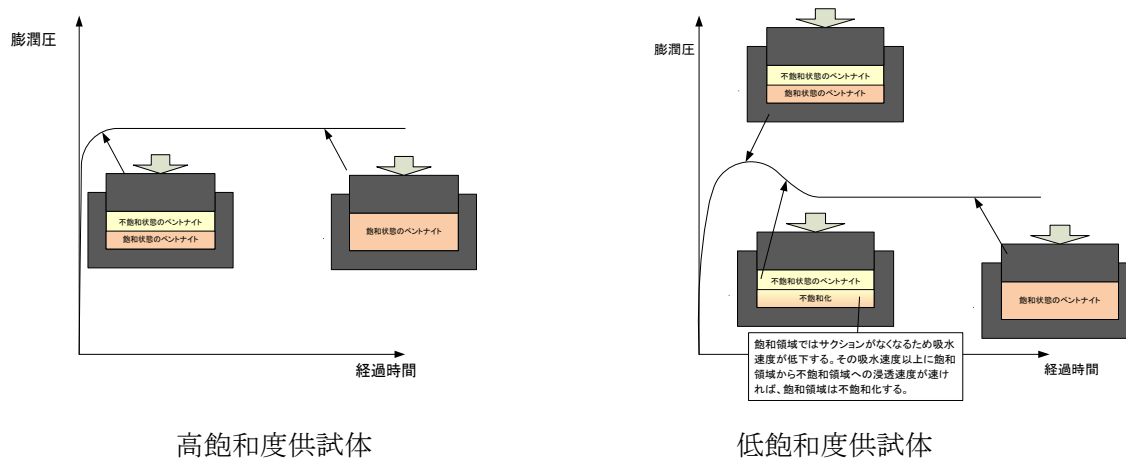


図 6.2.2-9 膨潤圧試験開始直後のイメージ



高飽和度供試体  
低飽和度供試体  
図 6.2.2-10 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ジョ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、このサクシジョ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、サクシジョンは飽和度が 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ジョンの開放によるものと見做せば、図 6.2.2-11 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[18]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すというより高度なアプローチも考えられる。

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、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推測したに過ぎない。この推論の確度を高めるためには、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。

実施する膨潤圧、膨潤量試験は力学的解釈が可能ないように、応力履歴を各実験段階で記録しておく必要がある。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も不可欠である。これらを十分に取得できれば、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。

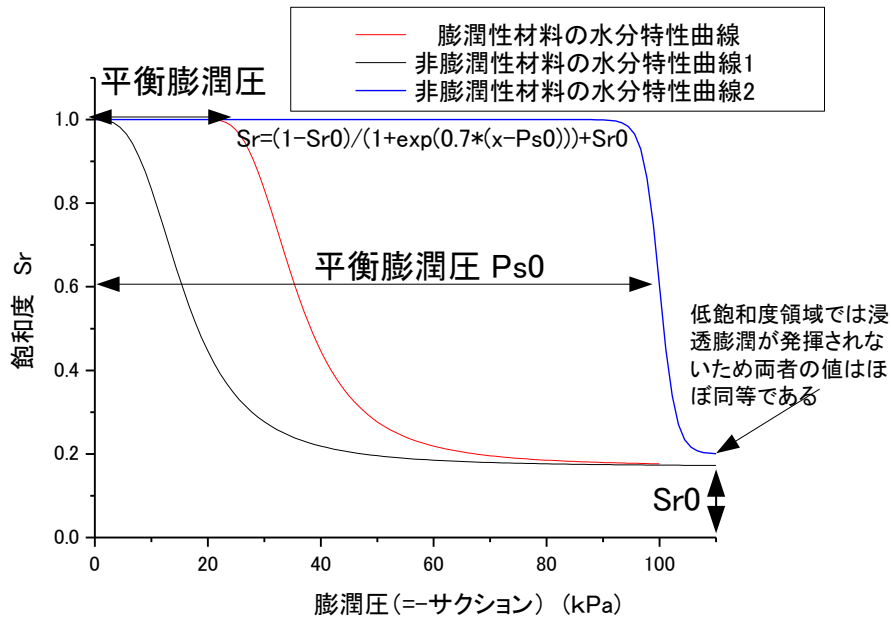


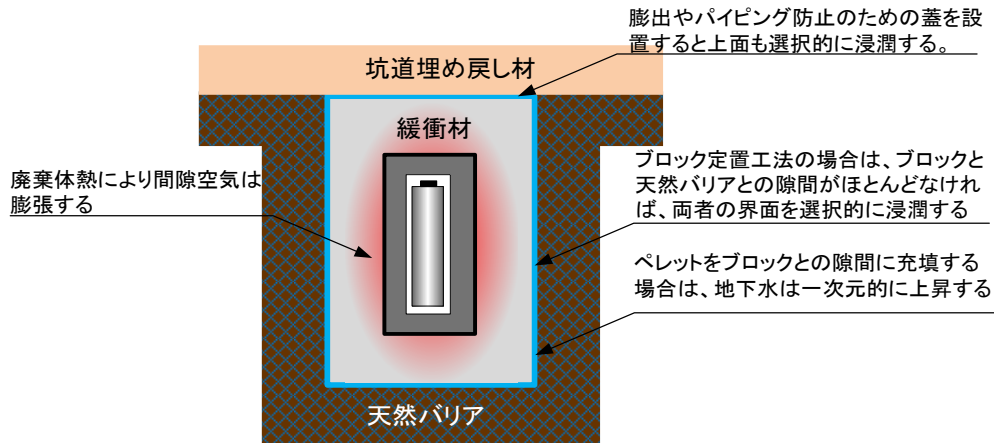
図 6.2.2-11 膨潤性鉱物の水分特性曲線のイメージ

### 6.2.3 浸潤による間隙空気の移行に関する検討

#### (1) 工学技術への反映

間隙空気の移行に関する試験では、緩衝材への地下水浸潤の過程で緩衝材内部にトラップされた間隙空気が、その後の地下水浸潤及ぼす影響を実験によって定量的に評価し、その成果を工学技術に反映することを目的とした。図 6.2.3-1 には浸潤による間隙空気の移行試験と同じ状態の縦置き処分施設のイメージを示す。既往の研究[20]における土槽内に設置したブロック緩衝材の二次元浸潤挙動評価試験では、供給水は土槽と緩衝材の界面を選択的に浸潤し、浸潤領域が緩衝材を取り囲み、その後ブロック間の隙間に浸潤していくという結果となった。この試験ではブロック施工を模擬しているが、実際のブロック施工では天然バリアとの界面には大きな隙間、若しくはペレットが充填されている可能性が高く、選択的に地下水が浸潤するとは考え難い。本試験条件は、むしろ原位置締固め工法に近いものと考えられる。また、縦置き処分概念では、緩衝材の膨出や水みちの発生を防ぐ目的で処分孔の上部に蓋を設置する方法が提案されている。このような場合も、蓋と緩衝材の界面には選択的に地下水が浸潤するものと思われる。





縦置き方式の概念図

図 6.2.3-1 浸潤による間隙空気の移行のイメージ

試験の結果、トラップされた空気が地下水に溶け込む速度が浸潤速度よりも遅く、地下水の緩衝材深部への浸潤が妨げられるという結果になれば、地下水浸潤と廃棄体熱で膨張によって加圧された間隙空気が破過する場合は懸念される。さらにトラップされた空気によって浸潤状況が変化するなどの影響があれば、浸潤のさせ方について検討する必要がある。すなわち、底部から一次元的に間隙空気が排気されやすいように浸潤させるなどの検討が必要となってくる。

一方、トラップされた空気が地下水に溶け込む速度が浸潤速度よりも速ければ、地下水が緩衝材深部へ浸潤すると並行して間隙空気が溶解するため、間隙空気圧の上昇が抑制され、上記のような懸念は比較的小さいと考えられる。ただし、水への気体の溶解度は温度が高くなるにつれて小さくなるため、廃棄体熱で浸潤した地下水の温度が上昇すれば再度、間隙空気として析出する可能性があることに注意が必要である。

実際の試験結果では、間隙空気圧増加はわずかであり、圧の増加による破過は生じなかった。本試験の結果からは、対策の必要はないと考えられる。ただし、本試験は常温での浸潤試験であるため、廃棄体の熱の影響については把握できていない。熱をかけた状態での浸潤試験を今後実施する必要がある。

## (2) 解析技術への反映

前述のように、緩衝材に地下水が浸潤する場合の間隙空気圧の増加の有無は緩衝材への浸潤速度と間隙空気の地下水への溶解速度の大小関係と廃棄体熱の大きさに依存する。これらの現象は、長期性能評価のためにも重要であり、THMC 解析によって評価されるべき現象である。

緩衝材への浸潤速度や間隙空気の地下水への溶解速度、さらに、これらに対する廃棄体熱の影響を解析するための方法は既に存在しており、本試験結果はこれらのベンチマークとなる試験である。THMC 連成解析については、実施するための解析ツールが整備されていないため、今後の開発が期待される。

## 6.2.4 Ca 型化が緩衝材に及ぼす影響の検討

### (1) 工学技術への反映

Ca 型化を検討する試験において、浸潤させる液種を変化させた試験の結果がまとめれば、Ca 型化と膨潤挙動の発生時期やその可逆性を定量的に評価できることが期待される。また、Ca 型化は緩衝材の設計仕様である部材厚がそのままであっても透水係数や膨潤性能が劣化するため、再冠水中の緩衝材に発生する様々な事象に影響を与えるものと考えられる。例えば、その代表的なものとして、緩衝材流出現象への対策工が挙げられる（図 6.2.4-1 参照）。

これまでの緩衝材の流出に関する試験によって、緩衝材流出現象が緩衝材の表面に発生することが示された。この緩衝材は、処分概念によっては、セメント系材料と接触するため、膨潤と同時に Ca 型化するのであれば、緩衝材の流出現象への対策を検討する際に考慮しなければならない。

例えば、緩衝材流出現象に対する対策として、人工給水を行った場合を考えれば、人工給水によって緩衝材が十分に膨潤して拡散場が形成されたとしても、セメント系人工バリアとの接触面において処分坑道の閉鎖前に Ca 型化が発生し、緩衝材表面だけが十分な止水性を発揮できない状態になるのであれば、人工給水は緩衝材流出現象への十分な対策とはならない可能性がある。

その一方で、蒸留水のようなイオンを含まない水（清水と呼ぶ）で膨潤させた後に Ca 型化させることで、処分坑道の閉鎖まで Ca 型化を抑制できるのであれば、清水で人工給水させることは、膨潤による拡散場の構築だけでなく、Ca 型化の影響を閉鎖までの間抑制させる対策として有効であるという結果になる可能性もある。

このように本試験結果は、Ca 型化が緩衝材流出現象に及ぼす影響を定量的に評価するために膨潤圧の観点から有用な情報を与えるものである。

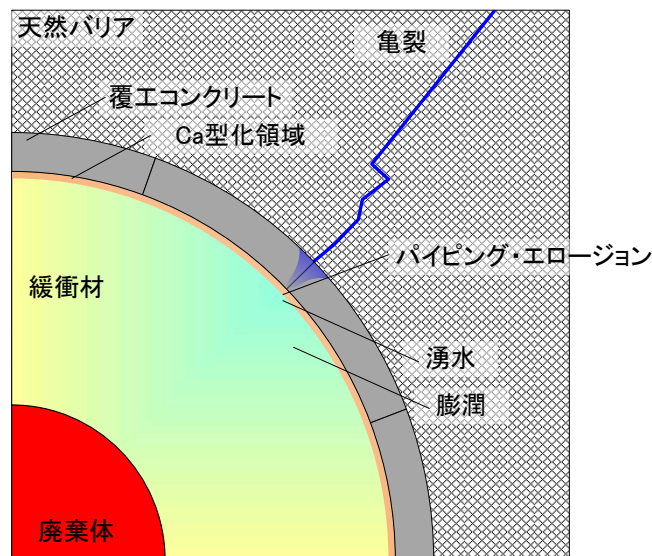


図 6.2.4-1 緩衝材表面近傍に発生する様々な事象のイメージ

### (2) 解析技術への反映

Ca 型化に関する試験では、Ca 化と膨潤挙動のどちらが再冠水初期に緩衝材の挙動に対して支

配的か、さらに Ca 化と膨潤挙動の発生順序の可逆性を定量的に評価している。これらの成果は、化学変質解析だけでなく、力学や間隙水の移流や拡散などのモデル化、ベンチマーク試験として役立つものである。

特に、排水の分析では、蒸留水で飽和させた緩衝材(Case1)と不飽和状態の緩衝材(Case2)にそれぞれ CaCl<sub>2</sub> 水溶液を流した場合、Case1 よりも Case2 の方が、その排水に含まれる陽イオン濃度が高いという結果が得られている。通常、化学解析における不飽和状態は、水と鉱物の接触面積の低下など、化学反応を低減させる要因として取り扱われる。しかしながら、本試験結果は、不飽和状態であっても十分に陽イオン交換反応が発生するため、Ca イオンリッチ水の不飽和浸潤挙動の把握が重要であることを示している。このような、不飽和状態の化学変質に関しては、化学解析を不飽和状態から実施できるモデル化へ反映させることができれば、有用な評価方法となり得る。

### 6.2.5 緩衝材の流出に関する検討

#### (1) 工学技術への反映

##### 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、以下のようなやり方である。まず、①流量と緩衝材流出量の関係の取得しておく。次に、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。③①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  $\rho_d$  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、

$$\bar{\rho}_d < \frac{M}{V}$$

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、

$$\bar{\rho}_d = \frac{\bar{M}}{V}$$

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、

$$E = M - \bar{M}$$

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、

$$E = \beta Q^\alpha$$

で与えられるため、許容される総湧水量 $Q$ が、

$$Q = \sqrt[\alpha]{\frac{E}{\beta}}$$

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（仮）閉鎖するまでの時間を $T$ とすれば、許容される流速 $q$ が、

$$q = \frac{Q}{T} = \frac{1}{T} \sqrt[\alpha]{\frac{E}{\beta}} = \frac{1}{T} \sqrt[\alpha]{\frac{M - M'}{\beta}}$$

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関しても検討が必要である（図 6.2.5-1 参照）。

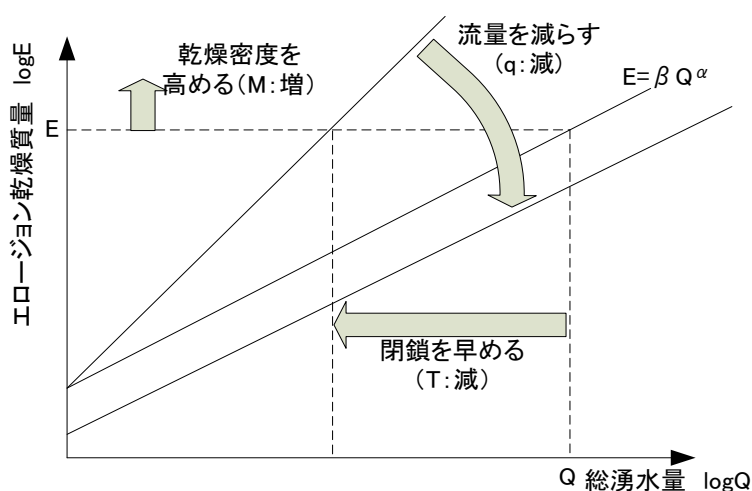


図 6.2.5-1 流量と緩衝材流出量の関係における湧水対策の意味

## 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、閉鎖時期を早めるというものが考えられる。その一方で、近年の地層処分事業に対しては、社会的な要請から廃棄体の再取出し可能性に関する検討が開始されている。なお、本検討では、再取出し可能な状態とは、連絡坑道の埋戻しがなされない状態とする。

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処分孔の端部プラグ設置、③閉鎖（連絡坑道埋戻し）、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。このような状態で、再取出し可能性を維持するためには、ある程度の緩衝材の流出を許容する必要がある、再取出し可能性と緩衝材流出現象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、再取出し可能な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必要がある。

### 3) 流量を減らす対策

廃棄体の回収可能な期間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コスト低減効果も見込める。

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、再取り出し可能な期間、ずっと排水処理によるコストが発生する。

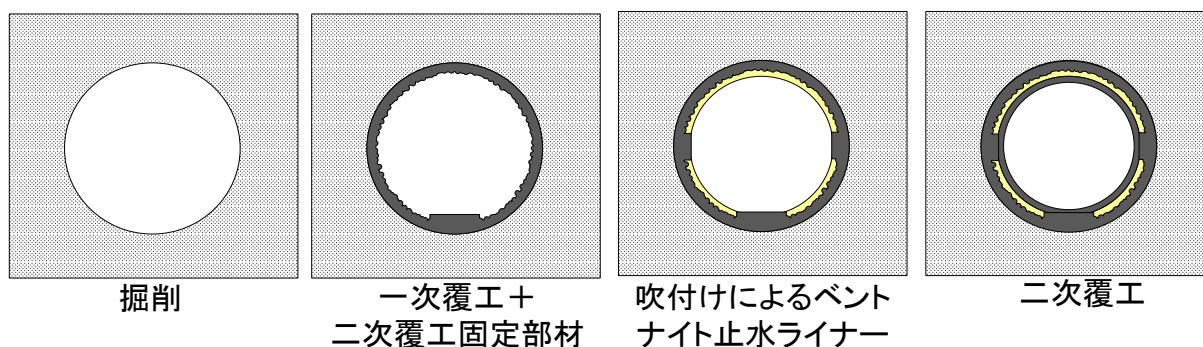


図 6.2.5-2 削孔→1次覆工→ベントナイト吹付け→2次覆工

### 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、前述のペレット充填ケースのように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、処分施設の施工コストの増大を招くが、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

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、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、蒸留水でも海水相当の NaCl 水溶液でも同様であった。収斂した1本の水みちの大きさに対して試験系は十分に大きいため、実際の処分孔や処分坑道の孔壁と緩衝材の間に多数の水みちが発生しても、最終的には1つの大きな水みちに収斂する可能性を示唆している。このことは、仮に処分孔としての使用可否を処分孔当たりの湧水量によって決定しても、処分孔当たりの湧水量が最終的には収斂した水みちを流れる湧水の流量となることを意味している。このため、収斂した水みちの流量と緩衝材流出が発生する流量の関係も考慮したうえで処分孔としての使用可否を決定する必要がある。

さらに、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 6.2.5-3 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 6.2.5-3 に示すフローは、ある一定期間、廃棄体を回収可能な状態に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、変化させることが出来る。



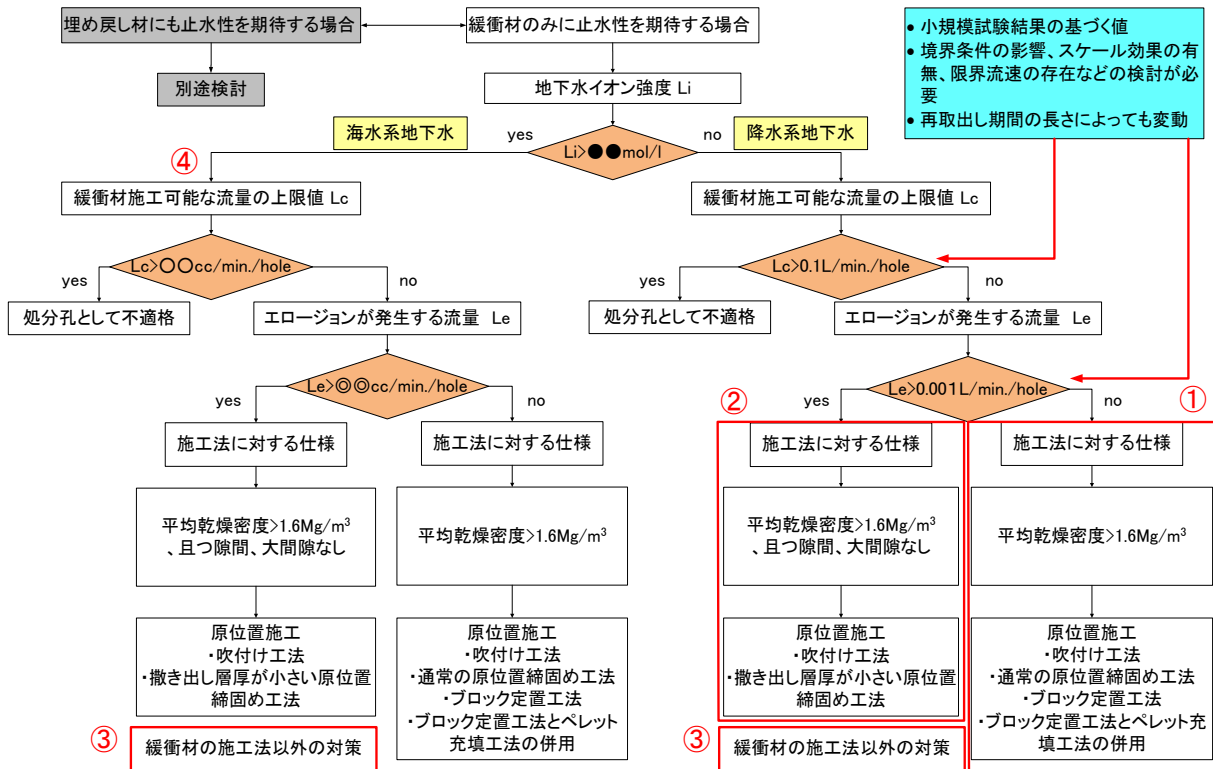


図 6.2.5-3 処分孔としての使用可否、および湧水を有する処分孔の緩衝材の最適な施工法の決定チャートにおける本検討結果反映先

平成 24 年度の緩衝材流出試験の Case9 の結果[22]から、液種が蒸留水であり、

① 湧水量  $Le$  が  $0.001 \text{L/min}$  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 6.2.5-3①)。つまり湧水量が  $0.001 \text{L/min}$  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  $Le > 0.001 \text{L/min}$  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、 $0.001 \text{L/min}$  では緩衝材流出は発生せず、 $0.005 \text{L/min}$  では緩衝材流出が発生したことから、 $Le = 0.005 \text{L/min}$  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0.1L/minの条件で施工を行った。この場合の1つの孔当たり0.0037L/min(Case1)の場合と0.03L/min(Case2)および0.003L/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0.1L/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、0.1L/minとなる。他の施工法に関しては、同様の検討が未実施であるため、取得する必要がある。

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つたため、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（再取り出し可能期間は一定）

【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ということが明らかとなった。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、前述の工学規模水みちの発生・緩衝材流出試験において検証する必要がある。また、不陸の形状や施工手順などに関しても今後、検討する必要がある。

【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（プレハイドレーション）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。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不可欠となる。

【不確実性】：緩衝材をプレハイドレーションさせると、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がある。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ものと考えられる。このため、前述の人工的な不陸の設置を併用するなど、複

合的な対策を取る必要があると考えられる。

#### ④ 塩水環境における仕様検討

【対策】：海水相当の 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不明である。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などの対策が考えられる。

【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。縦置き処分方式で、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。今後、塩水環境下においては、流量の方向と流出位置に関して考慮しながら検討を進める必要がある。さらに、地下水組成として、Na/Ca 等の陽イオンのイオン比もパラメータとすべきである。

#### 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非常に厳しくなり、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 6.2.5-1 と表 6.2.5-2 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[21]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 6.2.5-1 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 6.2.5-2 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		

## (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。

## 6.3 再冠水時の緩衝材の挙動に関わる力学解析手法の検討

### 6.3.1 概要

放射性廃棄物の地層処分において、緩衝材定置後の再冠水過程は、ベントナイトの浸潤挙動、膨潤挙動等により、その後の長期挙動に影響を及ぼすと考えられる。しかし、再冠水により緩衝材が飽和にいたるまでには数十年以上の期間を要し、実際にその挙動を把握することは難しい。そのため、解析により再冠水後の状態を予測することが必要となる。本研究では、室内試験で得られた結果をもとに、再冠水後の緩衝材の状態を予測するための力学解析を実施し、その手法の再現性を検証することを目的とする。

具体的には、飽和度の上昇に伴う膨潤変形の発生を表現できる不飽和弾塑性構成モデルを用いて、過去に実施されたベントナイト緩衝材の室内試験をシミュレーションし、構成モデルの適用性を検討する。シミュレーションの対象とする試験は、「平成 26 年度地層処分技術調査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」[1]にまとめられている一連の室内試験であり、「密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響試験」と「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」、及び、「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」が対象である。

### 6.3.2 土／水／空気連成初期値境界値問題の概要

#### (1) 場の支配方程式

本章では、土／水／空気連成問題における支配方程式、解析に用いる透水モデルと不飽和透水係数モデル・不飽和透気係数モデルを示す。弾塑性構成モデルの詳細は別途 6.3.2 節に纏めるものとする。

土/水/空気連成問題における増分形支配方程式は以下のようなになる[2] [3] [4]。

- ・釣合い式

$$\operatorname{div} \dot{\boldsymbol{\sigma}}^T + \dot{\rho} \mathbf{g} = 0, \quad \dot{\boldsymbol{\sigma}} = \dot{\boldsymbol{\sigma}}^T \quad (2.1)$$

- ・有効応力

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}' = \dot{\boldsymbol{\sigma}}^N + \dot{p}_s \mathbf{1}, \quad p_s = s S_e \quad (2.2)$$

- ・構成式

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}' = \mathbf{D} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \mathbf{C} \dot{S}_e \quad (2.3)$$

- ・ひずみ～変位関係式

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = -\frac{1}{2} (\nabla \dot{\mathbf{u}} + \nabla \dot{\mathbf{u}}^T) \quad (2.4)$$

- ・固相と液相の連続条件式

$$\dot{\varepsilon}_v = \operatorname{div} \dot{\mathbf{v}} - n \dot{S}_r \quad (2.5)$$

- ・固相と気相の連続条件式

$$(1 - S_r) \dot{\varepsilon}_v + n \dot{S}_r - n(1 - S_r) \frac{\dot{P}_a}{K_a} - \operatorname{div} \dot{\mathbf{v}}_a = 0 \quad (2.6)$$

・液相の Darcy 則

$$\tilde{\mathbf{v}} = -\mathbf{K}_w \cdot \text{grad}h \quad (2.7)$$

・気相の Darcy 則

$$\tilde{\mathbf{v}}_a = -\mathbf{K}_a \cdot \text{grad}h_a \quad (2.8)$$

・飽和度～サクシヨン関係

$$\dot{S}_r = \frac{dS_r}{ds} \dot{s} = \frac{dS_r}{ds} (\dot{p}_a - \dot{p}_w) \quad (2.9)$$

ここで、 $\boldsymbol{\sigma}'$ :有効応力増分テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}^N$ :ネット応力増分テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}$ :全応力増分テンソル、 $\dot{p}_s$ :サクシヨン応力増分、 $\dot{s}$ :サクシヨン増分、 $\mathbf{D}$ :剛性テンソル、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ :ひずみ増分テンソル、 $\mathbf{C}$ :係数テンソル、 $\dot{S}_e$ :有効飽和度増分、 $\dot{\mathbf{u}}$ :変位増分ベクトル、 $\tilde{\mathbf{v}}$ :間隙水の流速ベクトル、 $\mathbf{K}_w$ :不飽和透水係数テンソル、 $h$ :全水頭、 $S_r$ :飽和度、 $\dot{\varepsilon}_v$ :体積ひずみ増分、 $n$ :間隙率、 $K_a$ :空気の圧縮率、 $\tilde{\mathbf{v}}_a$ :間隙空気の流速ベクトル、 $\mathbf{K}_a$ :不飽和透気係数テンソルである。土/水/空気連成問題では、上記の支配方程式を以下の初期・境界条件の下で解くことになる。

#### 初期条件

$$\cdot \text{初期応力} \quad \boldsymbol{\sigma}'_i = \boldsymbol{\sigma}'_{i=0} \quad (2.10)$$

$$\cdot \text{初期水頭} \quad h_i = h_{i=0} \quad (2.11)$$

$$\cdot \text{初期空気圧} \quad P_{ai} = P_{ai=0} \quad (2.12)$$

$$\cdot \text{初期飽和度} \quad S_{ri} = S_{ri=0} \quad (2.13)$$

$$\cdot \text{初期間隙比} \quad e_i = e_{i=0} \quad (2.14)$$

#### 境界条件

$$\cdot \text{変位境界} \quad \bar{\mathbf{u}} = \dot{\mathbf{u}} \quad \text{on} \quad s_u \quad (2.15)$$

$$\cdot \text{応力境界} \quad \bar{\mathbf{t}} = \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n} \quad \text{on} \quad s_\sigma \quad (2.16)$$

$$\cdot \text{水頭境界} \quad \bar{h} = h \quad \text{on} \quad s_h \quad (2.17)$$

$$\cdot \text{流量境界} \quad \bar{q} = q \quad \text{on} \quad s_q \quad (2.18)$$

$$\cdot \text{空気圧境界} \quad \bar{p}_a = p_a \quad \text{on} \quad s_{p_a} \quad (2.19)$$

$$\cdot \text{空気量境界} \quad \bar{q}_a = q_a \quad \text{on} \quad s_{q_a} \quad (2.20)$$

本研究では、小林らの透水モデル[5] [6]を適用する。小林らは、ベントナイトの間隙を、モンモリロナイトの層間（内間隙）とそれ以外（外間隙）に分け、この内/外間隙の透水係数をそれぞれ算出し、以下の式を用いて全体の透水係数を算出している。

$$\frac{1}{k_w} = \frac{1}{k_{in}} + \frac{1}{k_{ex}} \quad (2.21)$$

ここで、 $k_w$  : 透水係数、 $k_{in}$  : 内間隙の透水係数、 $k_{ex}$  : 外間隙の透水係数である。内間隙の透水係数、外間隙の透水係数は Kozeny-Carman 則を用いて、

$$k_{in} = \frac{1}{C} \frac{\rho_w \cdot g}{\mu} \frac{1}{S_{vin}^2} \frac{e_{in}^3}{1+e_{in}} \quad (2.22)$$

$$k_{ex} = \frac{1}{C} \frac{\rho_w \cdot g}{\mu} \frac{1}{S_{vex}^2} \frac{e_{ex}^3}{1+e_{ex}} \quad (2.23)$$

で表す。ここで  $C$  : 形状関数 (=5)、 $\mu$  : 水の粘性係数 (=0.001Pa・s) であり、 $e_{in}$  : 内間隙比、 $e_{ex}$  : 外間隙比、 $S_{vin}$  : 内間隙部分の比表面積、 $S_{vex}$  : 外間隙部分の比表面積と定義し、次式で表わされる。

$$S_{vex} = S_v \left( \frac{e_{ex}}{e} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.24)$$

$$S_{vin} = S_v \left( \frac{e_{in}}{e} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.25)$$

$$e_{in} = w^* G_s \quad (2.26)$$

$$e_{ex} = e - e_{in} \quad (2.27)$$

ここで、 $S_v$  : 比表面積、 $w^*$  : 二層膨潤含水比であり、

$$S_v = 36 \times 10^6 w^* \rho_d \quad (\text{m}^2 / \text{m}^3) \quad (2.28)$$

$$w^* = \frac{\alpha_{mon} / 100}{0.052 + 10^{-5.42} \rho_d^{12.1}} \quad (2.29)$$

である。ここで、 $\rho_d$  : 乾燥密度、 $\alpha_{mon}$  : モンモリロナイト含有率(%)である。クニゲル V1 ( $\alpha_{mon} = 48\%$ ) を想定した場合、図 6.3.2-1 のようになる。

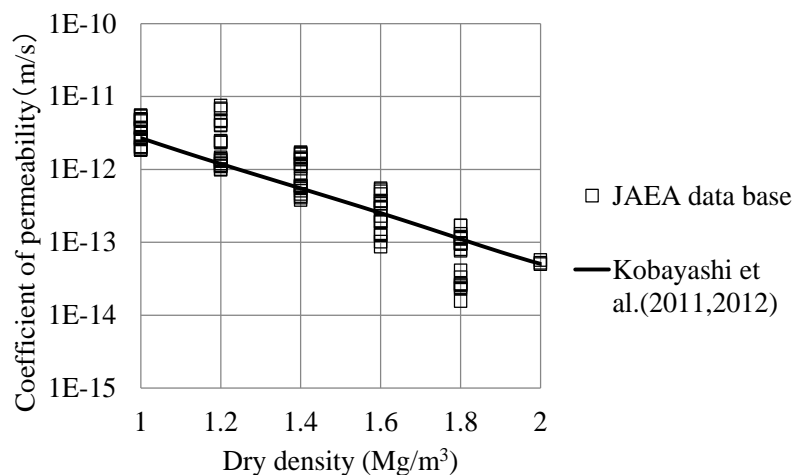


図 6.3.2-1 透水係数[7]

クニゲルV1 のようなベントナイト材料に対して、比透水係数や比透気係数を求めた実験デー



タがきわめて少ないので、本研究では、Mualemの不飽和透水係数推定モデル[8]と VanGenuchtenの透気係数式[9]を用いる。これらの関数モデルから導かれる不飽和透水係数と不飽和透気係数は、

$$K_w = k_w k_{rw} = k_w S_e^{\frac{1}{2}} \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (2.30)$$

$$K_a = k_a k_{ra} = k_a (1 - S_e)^{\frac{1}{2}} \left( 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^{2m} \quad (2.31)$$

で表わされる。ここで、 $K_w$ ：不飽和透水係数、 $k_w$ ：透水係数、 $k_{rw}$ ：比透水係数、 $K_a$ ：不飽和透気係数、 $k_a$ ：透気係数、 $k_{ra}$ ：比透気係数、 $m$ ：Mualem 定数である。

## (2) ベントナイト緩衝材の弾塑性構成モデル[10]

大野ら[11]の提案する *Se*-hardening モデルでは、不飽和土の力学特性である不飽和化による剛性の増大や、浸水によるコラプス現象を降伏曲面の拡大・縮小を制御するパラメータに有効飽和度を加え、飽和土の弾塑性構成モデルを拡張することで不飽和土の力学挙動を表現している。不飽和状態における有効応力は、

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma}^N + p_s \mathbf{1} \quad (2.32)$$

と与えることができる[12]。ここで、 $\boldsymbol{\sigma}'$ ：有効応力テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}^N (= \boldsymbol{\sigma} - p_a \mathbf{1})$ ：ネット応力テンソル、 $p_a$ ：間隙空気圧、 $p_s (= s S_e)$ ：サクシオン応力、 $S_e = (S_r - S_{r0}) / (1 - S_{r0})$ ：有効飽和度、 $s$ ：サクシオンである。

*Se*-hardening モデルでは、塑性体積ひずみ  $\varepsilon_v^p$  を硬化／軟化パラメータとし、塑性体積ひずみ  $\varepsilon_v^p$  は圧密による成分とダイレイタンシーによる成分からなると考える。すなわち、圧密による成分は、

$$\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_c} \quad (2.33)$$

であり、ダイレイタンシーによる成分は、

$$\varepsilon_v^p = D \left( \frac{q}{p'} \right) \quad (2.34)$$

である。ここで、 $\lambda$ ：圧縮指数、 $\kappa$ ：膨潤指数、 $e_0$ ：降伏時の間隙比、 $p'_c$ ：圧密降伏応力、 $D$ ：ダイレイタンシー係数である。不飽和状態における圧密降伏応力  $p'_c$  は、有効飽和度  $S_e$  を用いて、

$$p'_c = \zeta p'_{sat} \quad (2.35)$$

$$\zeta = \exp \left[ (1 - S_e)^n \ln a \right] \quad (2.36)$$

である。ここで、 $\zeta$ ：不飽和化に伴う剛性増加の倍率を決定する内挿関数、 $a$ 、 $n$ ：間隔を調整するパラメータ、 $p'_{sat}$ ：飽和時の降伏応力である。ゆえに降伏関数は、

$$f(p, q, S_e, \varepsilon_v^p) = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + D \left( \frac{q}{p'} \right) - \varepsilon_v^p = 0 \quad (2.37)$$

となる。図 6.3.2-2 は不飽和降伏特性を描いたものである。不飽和状態の正規圧密線は、飽和状

態の正規圧密線に対して、不飽和化に伴い上方方向にシフトしていく。図 6.3.2-3 は降伏曲面の概念図である。降伏曲面は飽和化に伴い縮小する。

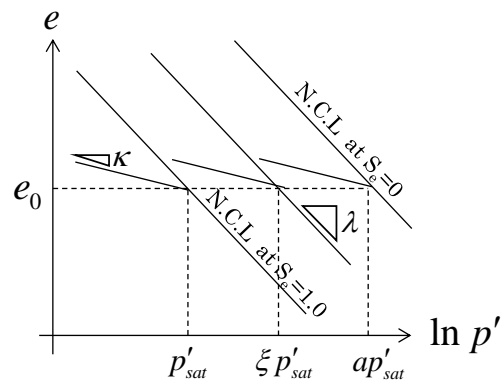


図 6.3.2-2 不飽和土の圧縮特性の概念図

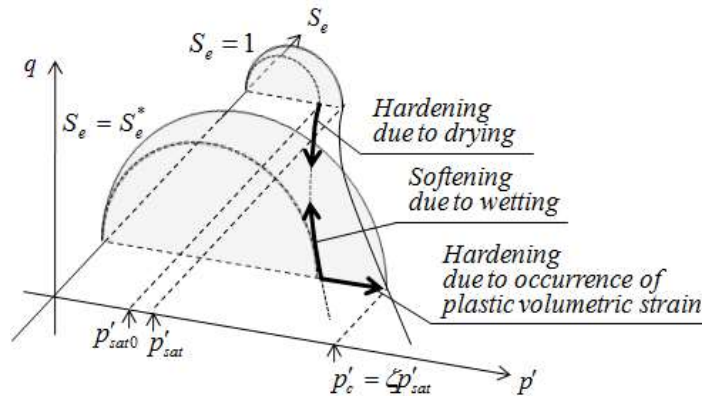


図 6.3.2-3 降伏曲面の概念図

クニゲル V1 の等飽和度線[13]は、

$$\frac{\rho_d}{\rho_w} = 0.156 \ln \sigma_v - 0.77 \exp(-S_r / 100 / 0.36) + 1.5 \quad (2.38)$$

であり、 $e - \ln \sigma_v$  関係上に描くと図 6.3.2-4 になる。図 6.3.2-4 を見ると、等飽和度線は、 $e - \ln \sigma_v$  関係上において上側にほぼ平行に存在している。ここで、小林らの等飽和度線は有効応力ではなく全応力を用いて描かれているが、サクシヨンの影響が相対的に小さな高拘束圧下では、ベントナイトに対しても大野らのモデル化と同様に有効飽和度を硬化パラメータとして用いることができると判断できる。すなわち、ベントナイトの任意の飽和度における圧密に対する変形を、

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^e + \varepsilon_v^p = \frac{\lambda}{1+e_0} \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} \quad (2.39)$$

と記述し、弾性部分と塑性部分をそれぞれ、

$$\varepsilon_v^e = \frac{\kappa}{1+e_0} \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} \quad , \quad \varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1+e_0} \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} \quad (2.40)$$

と表現する。ここで、飽和状態では塑性体積ひずみがほとんど生じないため、圧縮指数  $\lambda$ 、膨潤指数  $\kappa$  の関係は、

$$S_r = 1.0 \text{ の時 } \kappa \approx \lambda \quad (2.41)$$

$$S_r < 1.0 \text{ の時 } \kappa < \lambda \quad (2.42)$$

となる。また、図 6.3.2-4 に示したように等飽和度線が概ね平行に存在していることから、このモデルでは圧縮指数  $\lambda$  の飽和度依存性はなく、吸水除荷時の膨潤挙動を規定する膨潤指数  $\kappa$  のみが飽和度依存性を有すると考える。

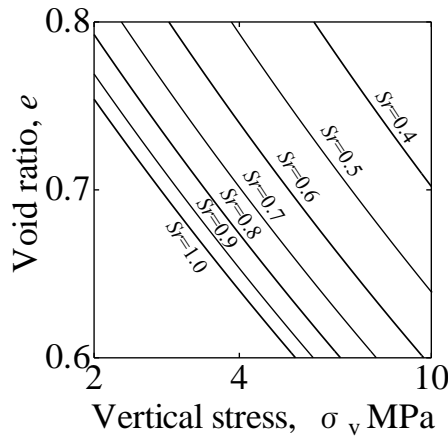


図 6.3.2-4 クニゲル V1 の等飽和度線

また、小林らの提案する完全飽和線は、 $e - \ln p'$  関係上では直線ではなく、間隙比が小さくなるにつれて線の傾きが小さくなる。しかしながらこのモデルでは  $e - \ln p'$  関係上では直線を仮定して用いる。そのため、 $e - \ln p'$  関係上で直線と見做せる範囲内に適用が限定される。ここで、本研究で用いる飽和正規圧密線は、

$$e = e_{ref} - \lambda \ln \frac{p'}{p'_{ref}} \quad (2.43)$$

であり、

$$e_{ref} = 0.65 \quad (2.44)$$

$$p'_{ref} = 0.14 \exp(0.06 \alpha_{mon}) \text{ (MPa)} \quad (2.45)$$

である。クニゲル V1 のモンモリロナイト含有率を 57% として間隙比—平均有効応力関係を描くと図 6.3.2-5 のようになる。図中には、完全飽和線を併記している。図を見ると、間隙比が約 0.2~1.2 の範囲では  $\lambda = 0.14$  を、間隙比が約 0.6~1.8 の範囲では  $\lambda = 0.21$  を用いれば直線として用いても問題ないと考えられる。鈴木らが行った膨潤圧試験[14]や、石川ら[15]や笹倉ら[16]が行った圧密試験は間隙比が約 0.4~1.3 の範囲であるため、これらの試験であれば、 $\lambda = 0.14$  を用いればよいと考えられる。また、膨潤量試験の場合は膨潤圧試験に比べて低密度な状態まで扱うことがあるため、想定する間隙比の範囲に応じて  $\lambda$  の値を使い分ける必要がある。

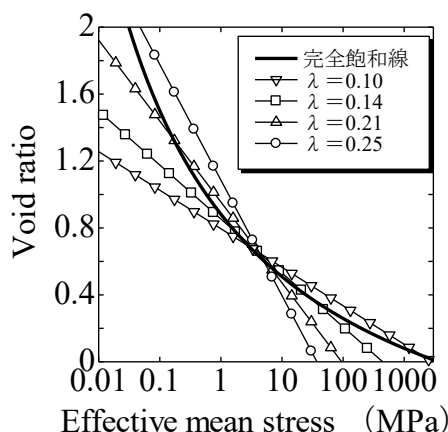


図 6.3.2-5 クニゲル V1 の完全飽和線と本研究で用いる正規圧密線の関係

本研究で用いる弾塑性構成モデルは、ベントナイト材料が飽和化により粒状体としての性質を消失し、ダイレイタンスーによる体積変形が生じなくなる材料と捉えている。つまり、負のダイレイタンスーによる体積変化は、

$$S_r = 1.0 \text{ の時 } \quad \varepsilon_v = \varepsilon_v^p \approx 0 \quad (2.46)$$

$$S_r < 1.0 \text{ の時 } \quad \varepsilon_v = \varepsilon_v^p \neq 0 \quad (2.47)$$

となる。本研究では、負のダイレイタンスーの表現式に大野らの EC モデル[17]を適用する。EC モデルでは、

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^p = \frac{MD}{n_E} \left( \frac{q}{p'M} \right)^{n_E} \quad (2.48)$$

となる。ここで、 $n_E$  : フィッティングパラメータ、 $M$  : 限界応力比であり、

$$MD = \frac{\lambda - \kappa}{(1 + e_0)} \quad (2.49)$$

とする。 $n_E = 1$ の時、式(2.48)はオリジナル Cam-clay モデルに帰着する。限界状態を規定する限界応力比が飽和度に依存しないとすると、負のダイレイタンスーによる変形は圧縮指数と膨潤指数の関係性で決まる。つまり圧縮指数と膨潤指数の関係は式(2.41) (2.42)であるが、これらは同時に式(2.46) (2.47)を満たす。これらを満たす具体式として、

$$\begin{aligned} \kappa &= \kappa(S_r) \\ &= \kappa_0 - (\kappa_0 - \kappa_{sat}) Se^l \end{aligned} \quad (2.50)$$

を仮定し、飽和化に伴う粒状性消失過程が表現されている。ここで  $\kappa_{sat}$  : 飽和状態における膨潤指数 ( $\kappa_{sat} \approx \lambda$ )、 $\kappa_0$  :  $S_e = 0$ における膨潤指数、 $l$  : 粒状性消失を制御するパラメータである。通常の土質材料であれば、 $\kappa_{sat} = \kappa_0$ である。例えば、 $\lambda = 0.125$ 、 $\kappa_0 = 0.01$ 、 $e_0 = 1.0$ 、 $M = 0.45$ を用いて膨潤指数、ダイレイタンスー係数を描くと図 6.3.2-6、図 6.3.2-7 のようになる。 $l$ の値が小さいほど、粒状体としての性質を消失し始めるのが早くなる。また、提案するモデルの状態曲面・膨潤壁面の概念図を図 6.3.2-8 に示す。状態曲面の形状として、通常の土質材

料と同様に不飽和状態では正規圧密線が飽和時よりも外側に存在する。また飽和化により、粒状体としての性質を消失していくため、状態曲面の形状が  $q$  軸上に立ち上がる形状をしている。

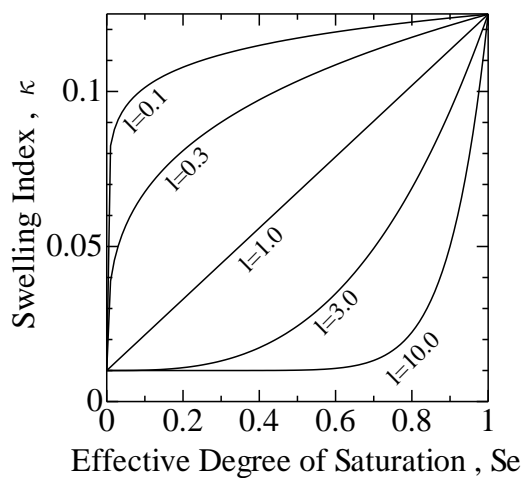


図 6.3.2-6  $\kappa$  の飽和度変化

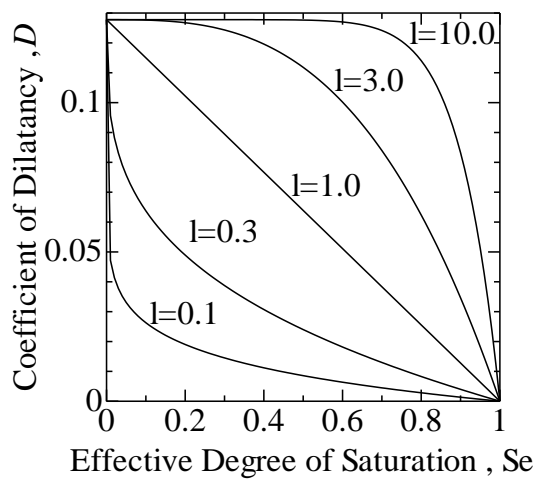


図 6.3.2-7  $D$  の飽和度変化

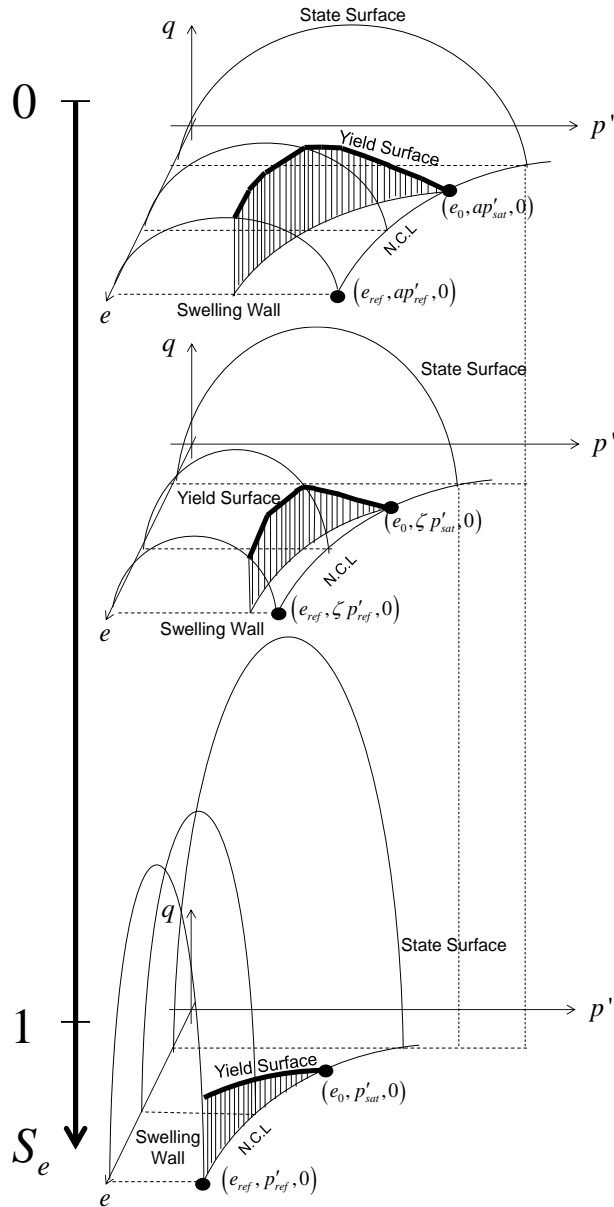


図 6.3.2-8 状態曲面・膨潤壁の概念図

上述の弾塑性構成モデルの応力ひずみ関係を導出する。弾性状態における圧密による間隙比は

$$e = e_0 - \kappa \ln \frac{p'}{\xi p'_{sat}} \quad (2.51)$$

で表わされる。ここで、式(3.20)における  $e_0$ 、 $p'_{sat}$  は、

$$e_0 = e_{ref} - \lambda \ln \frac{p'_{sat}}{p'_{ref}} \quad (2.52)$$

を満たす。また、式(2.51)より、平均有効応力増分は、

$$\dot{p}' = K \dot{\epsilon}_v^e + K_{S_e} \dot{S}_e \quad (2.53)$$

となる。ここで、

$$K = \frac{1 + e_0}{\kappa_0 - (\kappa_0 - \kappa_{sat}) Se^l} p' \quad (2.54)$$

$$K_{S_e} = \frac{(\kappa_0 - \kappa_{sat}) l Se^{l-1} \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} - [\kappa_0 - (\kappa_0 - \kappa_{sat}) Se^l] n (1 - Se)^{n-1} \ln a}{\kappa_0 - (\kappa_0 - \kappa_{sat}) Se^l} p' \quad (2.55)$$

$$\dot{\varepsilon}_v^e = -\frac{\dot{e}}{1 + e_0} \quad (2.56)$$

である。式(2.53)を内包する非線形弾性構成モデルとして

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}' = \mathbf{C}^e : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e + K_{S_e} \dot{S}e \mathbf{1} \quad (2.57)$$

を用いる。ただし、

$$\mathbf{C}^e = K \mathbf{1} \otimes \mathbf{1} + 2G \mathbf{A} \quad (2.58)$$

$$G = \frac{3(1 - 2\nu')}{2(1 + \nu')} K \quad (2.59)$$

であり、 $G$  : せん断弾性係数、 $\nu'$  : 有効ポアソン比である。 $Se$ -hardening モデル に EC モデル を組み込んだ降伏関数は、

$$f(\boldsymbol{\sigma}', Se, \varepsilon_v^p) = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + \frac{\lambda - \kappa}{(1 + e_0) n_E} \left( \frac{q}{p' M} \right)^{n_E} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (2.60)$$

である。現応力が常に降伏曲面上にあるとすると、適応条件は、

$$\dot{f}(\boldsymbol{\sigma}', Se, \varepsilon_v^p) = \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} : \dot{\boldsymbol{\sigma}}' + \frac{\partial f}{\partial Se} \dot{S}e + \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \dot{\varepsilon}_v^p = 0 \quad (2.61)$$

である。塑性ひずみ速度  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p$  が、関連流れ則

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = \gamma \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} \quad (2.62)$$

によるとする。ただし、 $\gamma$  : 塑性係数である。ここで、ひずみ速度が弾性成分と塑性成分に分解されるとすると、

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p \quad (2.63)$$

とかける。式(2.61)に式(2.57)、(2.63)を代入すると、

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}' = \mathbf{C}^e : \left( \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \gamma \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} \right) + K_{S_e} \dot{S}e \mathbf{1} \quad (2.64)$$

となる。これを適応条件式(2.61)に代入し塑性係数  $\gamma$  について解くと、

$$\gamma = \frac{\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} : \mathbf{C}^e : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \left[ \frac{\partial f}{\partial p'} K_{S_e} + \frac{\partial f}{\partial Se} \right] \dot{S}e}{\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} : \mathbf{C}^e : \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} - \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \frac{\partial f}{\partial p'}} \quad (2.65)$$

となる。さらにこれを式(2.64)に代入すると、



$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}' = \left[ \mathbf{C}^e - \frac{\mathbf{C}^e : \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} \otimes \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} : \mathbf{C}^e}{\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} : \mathbf{C}^e : \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} - \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \frac{\partial f}{\partial p'}} \right] : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \left[ \frac{\mathbf{C}^e : \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} \left( \frac{\partial f}{\partial p'} K_{S_e} + \frac{\partial f}{\partial S_e} \right)}{\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} : \mathbf{C}^e : \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} - \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \frac{\partial f}{\partial p'}} - K_{S_e} \mathbf{1} \right] \dot{S}_e \quad (2.66)$$

と応力-ひずみ関係が導かれる。ただし、

$$\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}'} = \frac{MD}{3p'} \left[ 1 - \left( \frac{q}{p'M} \right)^{n_E} \right] \mathbf{1} + \frac{3D}{2qp'} \left( \frac{q}{p'M} \right)^{n_E-1} \mathbf{s} \quad (2.67)$$

$$\frac{\partial f}{\partial p'} = \frac{MD}{p'} \left[ 1 - \left( \frac{q}{p'M} \right)^{n_E} \right] \quad (2.68)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial S_e} = & \frac{(\kappa_0 - \kappa_{sat}) l S_e^{l-1}}{1 + e_0} \left[ \ln \frac{p'}{p'_{sat} \exp[(1 - S_e)^n \ln a]} + \frac{1}{n_E} \left( \frac{q}{pM} \right)^{n_E} \right] \\ & + \frac{\lambda - \kappa_0 + (\kappa_0 - \kappa_{sat}) S_e^l}{1 + e_0} (1 - S_e)^{n-1} n \ln a \end{aligned} \quad (2.69)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} = -1 \quad (2.70)$$

である。

### 6.3.3 密度の異なる供試体に対する直列均質化試験シミュレーション

#### (1) 試験の概要

ここで解析対象とする力学試験は、密度の異なる圧縮ベントナイト供試体に対する直列均質化試験である。この試験は、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ために実施されており、密度の異なる二つの圧縮ベントナイト供試体を一次元的な応力のつり合いを満足した状態でそれぞれ浸潤・吸水させ、平衡状態に至ったときに初期の密度差が残留するか否かを実験的に検証している。処分施設における緩衝材の長期性能評価では、施工方法特有の密度分布は考慮されず、均一な乾燥密度となることを想定し、実施されていた。しかしながら、施工後の密度分布の不均一さが再冠水後に解消されないとすれば、このことを陽に考慮できる解析手法を整備したうえで性能照査がなされるべきである。

この試験は、図 6.3.3-1 に示すような直列膨潤量試験装置を用いて行われている。試験上、留意されている試験条件は以下の通りである。

- 供試体内に間隙の空気がトラップされないように、それぞれの供試体は一方向、一次元に浸潤させる。
- 一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困難になることから、図 6.3.3-1 に示すように密度の異なる均質供試体の膨潤試験機のピストンを直列に繋ぎ、ピストンの移動量を計測することで各供試体の膨潤量を計

測する。

- 直列膨潤量試験装置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、下側の供試体にピストンの死荷重が作用することを避けるために、ピストン荷重 (3520g) を相殺するカウンタウェイトを設置する (図 6.3.3-2)。

実施された試験の試験ケースを表 6.3.3-1 にまとめる。NaCl 水溶液を使用した試験も行われているが、本研究の解析では蒸留水を使用した試験のみを対象とする。表にまとめられるように、いずれの試験ケースでも、高密度供試体と低密度供試体の平均乾燥密度が目標で  $1.6\text{Mg/m}^3$  となるように作製されている。表に示されている初期含水比を用い、土粒子比重  $G_s = 2.707$  から初期飽和度を算出すると、いずれの試験ケースでも吸水前の初期飽和度が 100% に近い値となる。試験では、ほとんど飽和状態にある 2 供試体の均質化を調べることが目的であったようである。

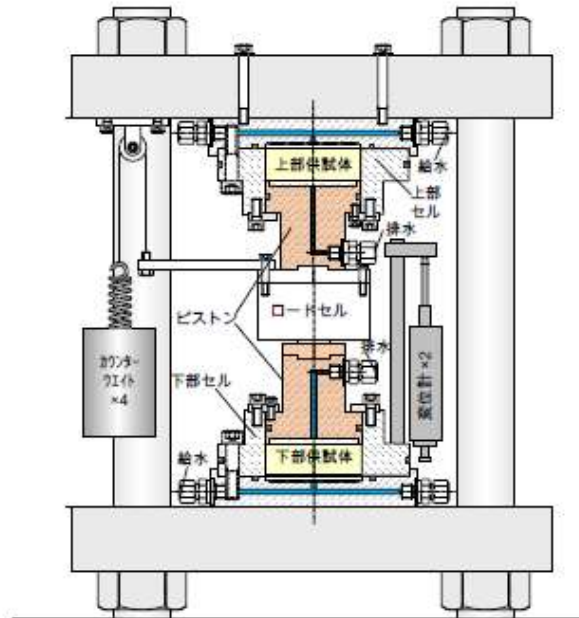


図 6.3.3-1 直列膨潤量試験装置の概略図 (再掲)



図 6.3.3-2 直列膨潤量試験装置の近影 (再掲)

表 6.3.3-1 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[20]

試験 ケース	高乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	低乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	初期含水比 (%)		給水方法
			18.97	34.84	
1	1.798(1.8)	1.399(1.4)	18.97	34.84	圧力制御
2	1.984(2.0)	1.190(1.2)	13.41	46.76	流量制御→圧力制御
3	1.698(1.7)	1.493(1.5)	19.81	27.35	圧力制御

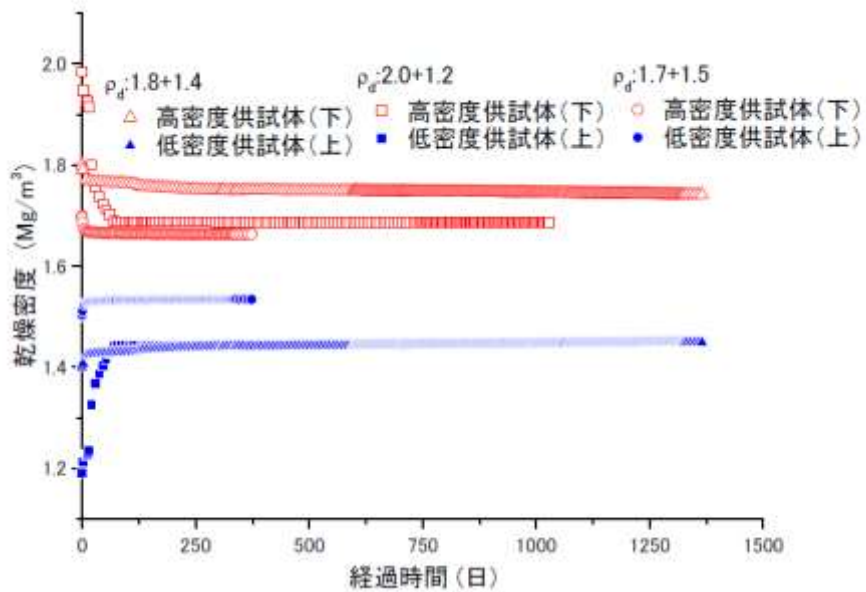


図 6.3.3-3 給水に伴う乾燥密度の変化(再掲)

図 6.3.3-3 に3つの試験から得られた、給水に伴う高密度供試体と低密度供試体の経時変化を示す。どの試験ケースにおいても、下部にある高密度供試体が給水に伴って膨張（乾燥密度が低下）し、その膨張量と同じだけ、上部の低密度供試体は圧縮（乾燥密度が上昇）する。すなわち、吸水に伴って二つの供試体の密度差は解消するのであるが、完全に解消し乾燥密度が同じになるわけではない。十分に時間が経過し、両供試体の乾燥密度が定常化に至ったとき、に示すように密度差が幾らか残留する。試験ケース1（乾燥密度 1.8 Mg/m<sup>3</sup> と 1.4 Mg/m<sup>3</sup>）については、試験開始から2、250日経過まで試験が継続されているが、図 6.3.3-3 で示す経過時間以降、ほとんど密度変化は生じず、最終的に有意な密度差が残り続けているようである。

## (2) 解析手法および解析条件

ベントナイト緩衝材の飽和／不飽和化による力学挙動を表現する弾塑性構成モデルは、有効応力の原理および水分特性と連立し、対象とする問題に応じた適切な応力条件・ひずみ条件・含水比条件を課すことにより、要素としての力学応答を記述・解析することができる。ここでは、上記の試験を二要素の連結問題として扱い、試験条件に相当する適切な制約条件を課し、シミュレーションする。基本的に、6.3.2の土／水／空気連成問題の支配方程式を踏襲し、以下の仮定を設けた解析を行う。

- 供試体内の不均一性は排除し、各供試体を要素と見做す。要素と見做すことから、応力、ひずみなどの物理量は供試体内に不均一に分布することなく、一つの値で代表されるものとする。
- 飽和状態における完全排水状態と同様、水圧やサクションも供試体内で一つの値を持つ。したがって、この問題は透水係数や透気係数に無関係になる。

以上を踏まえると、一次元問題における各供試体の支配方程式は以下のようにまとめられる。

$$\text{水分特性：} \quad \dot{s} = X_a \dot{S}_e \quad (3.1)$$

$$\text{構成関係：} \quad \begin{Bmatrix} \dot{\sigma}'_a \\ \dot{\sigma}'_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{aa} & 2c_{ar} \\ c_{ra} & 2c_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_a \\ \dot{\epsilon}_r \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} c_a^s \\ c_r^s \end{Bmatrix} \dot{S}_e \quad (3.2)$$

$$\text{有効応力式：} \quad \begin{Bmatrix} \dot{\sigma}'_a \\ \dot{\sigma}'_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{\sigma}_a \\ \dot{\sigma}_r \end{Bmatrix} + s \dot{S}_e \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + S \dot{S}_e \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\text{適合条件：} \quad \dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_a + 2\dot{\epsilon}_r = X_w \dot{w} + X_s \dot{S}_e \quad (3.4)$$

1要素に対してこの問題を解くとき、解くべき式は6本あり、未知数は $\dot{s}$ 、 $\dot{S}_e$ 、 $\dot{\epsilon}_a$ 、 $\dot{\epsilon}_r$ 、 $\dot{w}$ 、 $\dot{\sigma}'_a$ 、 $\dot{\sigma}'_r$ 、 $\dot{\sigma}_a$ 、 $\dot{\sigma}_r$ の9つであるため、9つの未知数の内、3つを試験の制約条件あるいは境界条件から既知量として与えて連立方程式を解くことになる。一方、ここで対象とする問題は、二要素各々について問題を解かなければならず、解くべき式は $6 \times 2 = 12$ 本、未知数は $9 \times 2 = 18$ つとなる。したがって、問題を解くための制約条件あるいは境界条件を試験条件から6つ定めなければならない。以降では区別のために、高密度要素に対する物理量には右上に $H$ を、低密度要素に対する物理量には右上に $L$ を添え字として付す。試験条件に対応する6つの制約条件・境界条件は次の通りである。

まず、一次元問題であり、それぞれの要素について側方ひずみが生じないことから次の2つの条件が定まる。

$$\dot{\varepsilon}_r^H = \dot{\varepsilon}_r^L = 0 \quad (3.5)$$

次に、高密度要素と低密度要素の鉛直方向の全応力は常に等しいため、次式が成り立つ。

$$\dot{\sigma}_r^H = \dot{\sigma}_r^L \quad (3.6)$$

また、二つの供試体の高さの和が一定であり、初期高さが等しいことから、次式が成り立つ。

$$\dot{\varepsilon}_a^H + \dot{\varepsilon}_r^L = 0 \quad (3.7)$$

以上で4つの制約条件・境界条件が定まったわけであるが、これらに加えて給水履歴を与えるために、サクシオン制御を考える。

サクシオン制御条件：
$$\dot{s}^H = \dot{s}^L = \bar{\dot{s}} \quad (3.8)$$

高密度要素、低密度要素のいずれも初期には不飽和状態にあるため初期サクシオンをもつ。給水過程においては、サクシオンが消失し飽和化するまで単調にサクシオンを除荷する履歴を与える。

解析条件を表 6.3.3-2 に示す。実験と同じく、高密度供試体と低密度供試体の初期の乾燥密度の平均値を 1.6Mg/m<sup>3</sup>としている。CASE1 から CASE3 では、高密度要素、低密度要素の初期含水比をそれぞれ 12%、15%と置き、初期密度差の違いによる力学挙動の違いを見るために、試験と同様、3種の初期乾燥密度差を設定している。CASE4 と CASE5 では、CASE1 と同様、高密度要素、低密度要素の初期乾燥密度をそれぞれ 1.6Mg/m<sup>3</sup>と 1.4Mg/m<sup>3</sup>とし、各々について異なる初期含水比を設定している。

解析で用いた材料パラメータを表 6.3.3-3 にまとめる。高密度要素と低密度要素は、初期状態が異なるのみで同じ材料からなることから、材料パラメータも全く同じ数値を用いている。

表 6.3.3-2 解析条件

解析 ケース	高乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	低乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	初期含水比 (%)		給水方法
CAES1	1.8	1.4	12	15	圧力制御
CASE2	2.0	1.2	12	15	圧力制御
CASE3	1.7	1.5	12	15	圧力制御
CASE4	1.8	1.4	13	14	圧力制御
CASE5	1.8	1.4	10	17	圧力制御

表 6.3.3-3 各パラメータの値

パラメータ	記号	数値
土粒子比重	$G_s$	2.707
圧縮指数	$\lambda$	0.140
膨潤指数 (最乾燥時)	$\kappa_0$	0.010
膨潤指数 (飽和時)	$\kappa_{sat}$	0.139
限界応力比	$M$	0.500
ポアソン比	$\nu'$	0.450
Se-hardening モデルパラメータ	$a$	100.000
Se-hardening モデルパラメータ	$n$	1.000
下負荷面パラメータ	$m$	0.000
EC モデルパラメータ	$n_E$	1.800
水分特性 (吸水) パラメータ	$A_w$	-2.000
水分特性 (吸水) パラメータ	$B_w$	3.000
水分特性 (脱水) パラメータ	$A_D$	-6.000
水分特性 (脱水) パラメータ	$B_D$	3.000
残留飽和度	$S_{r0}$	0.100
膨潤指数変化パラメータ	$l$	10.000
基準間隙比	$e_{ref}$	0.750
基準先行圧	$p'_{ref}$	2.000

### (3) 解析結果

図 6.3.3-4～図 6.3.3-8 に、CASE1～CASE5 の給水過程における乾燥密度変化および間隙比－平均有効応力関係を示す。赤線が高密度要素、青線が低密度要素の経路を示しており、間隙比－平均有効応力関係における黒線は完全飽和線を示している。すべてのケースにおいて、密度差は小さくなっているが、試験同様に密度差は解消されないことがわかる。また、間隙比－平均有効応力の関係から、低密度要素が降伏し弾塑性状態に至った後に密度差は急激に小さくなる挙動を示した。初期含水比が同じであるケース (CASE1、CASE2、CASE3) について図 6.3.3-4～図 6.3.3-6 を比較すると、両供試体の初期乾燥密度の差が小さければ小さいほど最終的な密度差は小さくなる傾向にあることが分かる。また、初期乾燥密度は同じであるが異なる初期含水比をもつケース (CASE1、CASE4、CASE5) について、図 6.3.3-4、図 6.3.3-7、図 6.3.3-8 と比較すると、最終的な密度差は同じになった。つまり初期乾燥密度が等しければ初期含水比の値に関わらず密度差は同じになる。

いずれのケースにおいても、吸水が始まってしばらくは間隙比の変化が小さいが、低密度要素が降伏し弾塑性状態に至った後は、低密度要素が剛性低下し大きな圧縮変形を呈するとともに、高密度要素は弾性状態を維持しつつ膨張変形を示している。

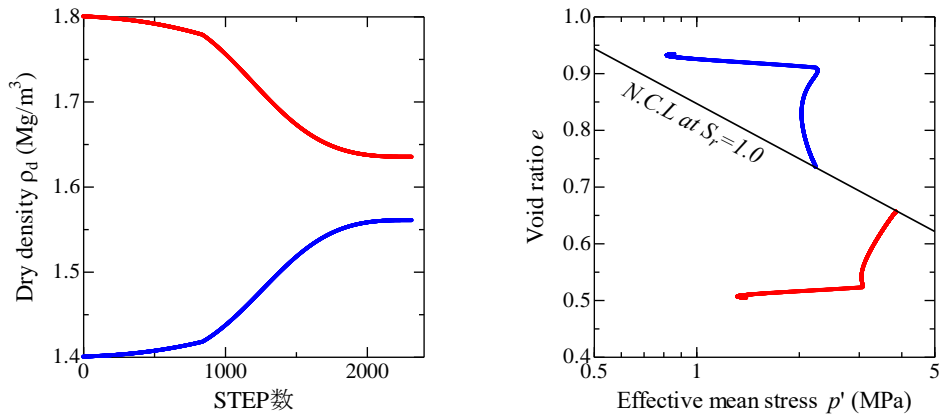


図 6.3.3-4 乾燥密度変化および間隙比-平均有効応力関係 (CASE1)

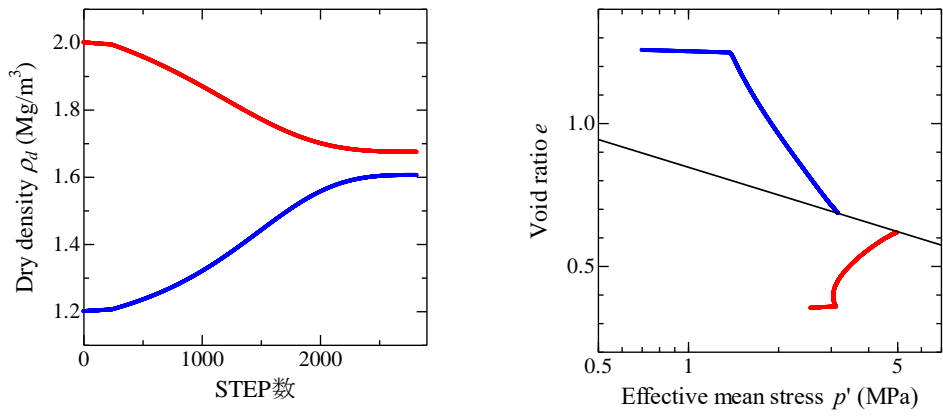


図 6.3.3-5 乾燥密度変化および間隙比-平均有効応力関係 (CASE2)

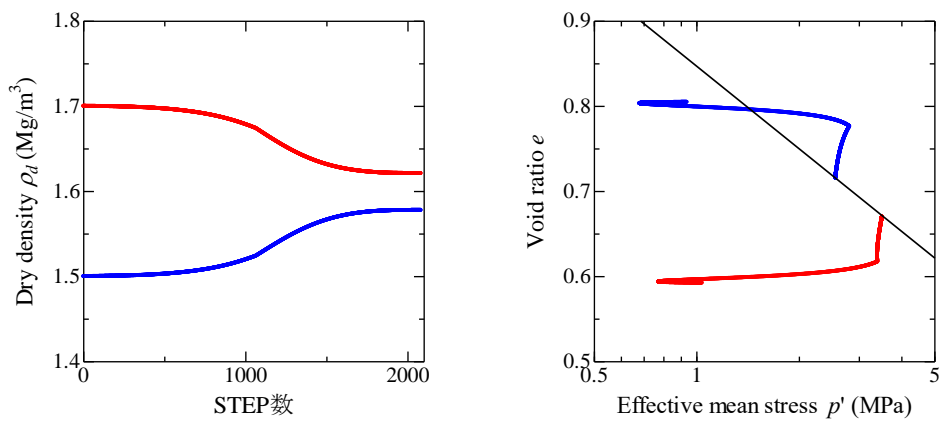


図 6.3.3-6 乾燥密度変化および間隙比-平均有効応力関係 (CASE3)



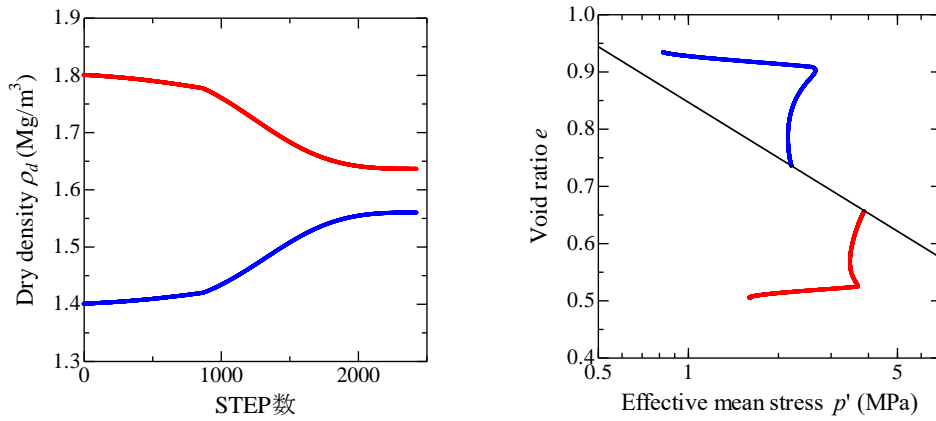


図 6.3.3-7 乾燥密度変化および間隙比-平均有効応力関係 (CASE4)

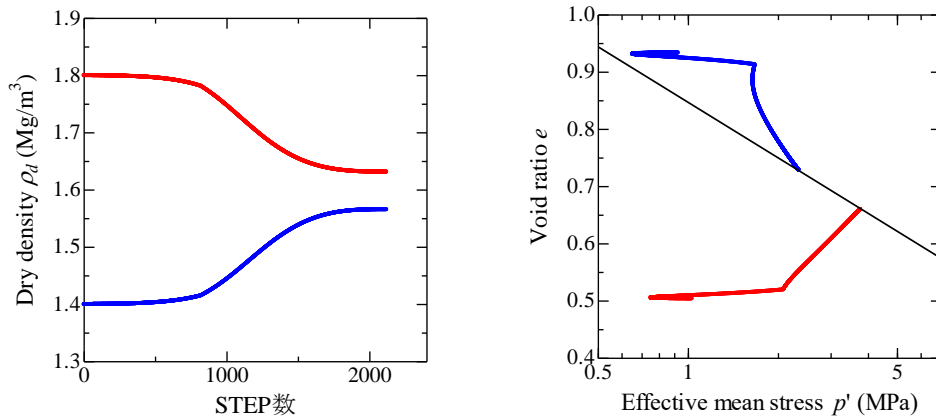


図 6.3.3-8 乾燥密度変化および間隙比-平均有効応力関係 (CASE5)

図 6.3.3-9 に全てのケースについての応力経路 (全応力および有効応力の経路) を示す。図中、実線は全応力経路、点線は有効応力経路を示しており、それぞれ軸方向と側方向の応力成分の変化として経路を示している。初期状態においては、高密度要素と低密度要素の全応力が鉛直方向、水平方向ともにゼロであり等しいが、異なる飽和度を持つためにサクション応力は異なり、有効応力に差異が生じる。給水過程においては、制約条件から両供試体の全応力の軸方向成分は常に同値を保つが、高密度要素は吸水・膨張、低密度は吸水・圧縮の履歴を辿り、両供試体の有効応力の側方向成分に差異が生じる。この有効応力の側方成分の差異が、両供試体のサクション応力が消失する飽和状態に至っても残留することとなる。すなわち、供試体間で有効応力の軸方向成分は等しいが、側方向成分は異なるという状態が最終状態で現れることになり、供試体間に平均有効応力の差が生まれる。この解析で用いた構成モデルは、飽和状態では間隙比と平均有効応力の関係が一对一に与えられているものであり、飽和状態において供試体間に平均有効応力差があれば必ずと間隙比差が生まれることになる。ここで実施したシミュレーションでは、両供試体が

飽和状態に至ったときに密度差が残留するメカニズムは以上のように説明できる。

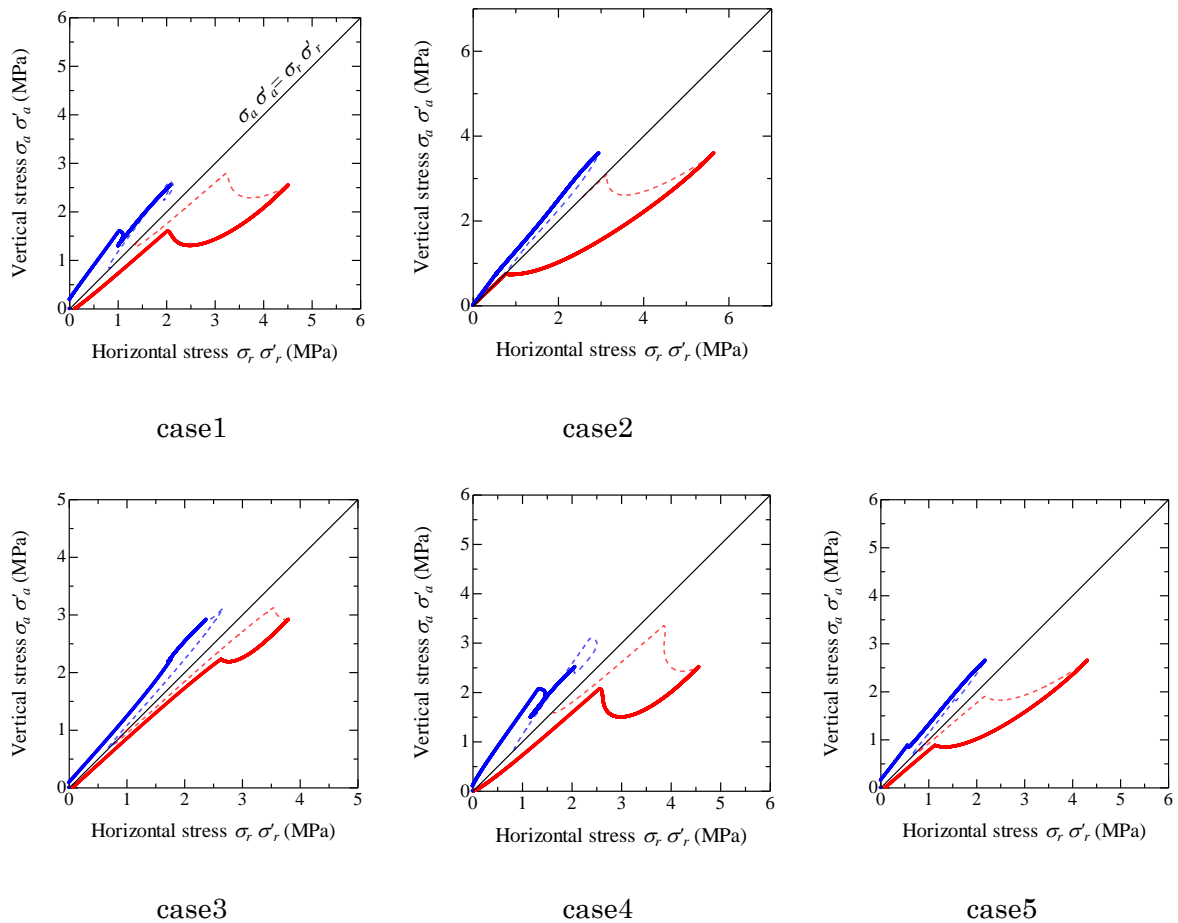


図 6.3.3-9 すべてのケースにおける軸応力-側応力、軸有効応力-側有効応力の関係

### 6.3.4 応力履歴の異なる供試体に対する直列均質化試験シミュレーション

#### (1) 試験の概要

本項で解析対象とする力学試験は、応力履歴の異なる圧縮ベントナイト供試体に対する直列均質化試験である。この試験は、乾燥密度は同じであるが、その乾燥密度状態を実現するために過去に与えられた応力履歴が異なる二つの圧縮ベントナイト供試体を一次元的な応力のつり合いを満足する状態でそれぞれ浸潤・吸水させ、平衡状態に至ったときに密度差が生じるか否かを実験的に検証している。再冠水前に処分施設の緩衝材の乾燥密度が理想的に均一であったとしても、含水比は不均一でありうることは、締固め曲線において含水比と乾燥密度が一对一にならないことから容易に想像できる。また、不飽和状態にあるベントナイト緩衝材の力学特性が非可逆性を有し、弾塑性的な地盤材料と解釈されるのであれば、同一の乾燥密度に対しても異なる応力履歴や異なる応力状態が存在することも想像に難くない。ベントナイト緩衝材の力学応答が弾塑性的であれば、一般には乾燥密度が同じであっても、応力履歴や応力状態の違いが剛性の変化をもた

らすため、これらの違いが再冠水過程における乾燥密度の不均一性を促すことも十分考えられる。

この試験でも前章の図 6.3.3-1 に示した直列膨潤量試験装置が用いられている。試験の詳細図および給水過程の制御プロセスを図 6.3.4-1 と図 6.3.4-2 にそれぞれ示す。試験ではまず、含水比調整され、設定した異なる二つの乾燥密度まで静的に締め固めたベントナイト供試体を上部と下部の圧密容器に設置する。このとき、下部圧密容器には乾燥密度の高い供試体が、上部圧密容器には乾燥密度の低い供試体が配置されるが、上下のピストンは連結されずピストン間に隙間が設けられ、それぞれ独立性を保った状態にある。この後しばらくは、上部供試体には変形が生じないように、上部供試体に対する載荷板と圧密容器をねじによって連結する。次いで、高乾燥密度の下部供試体のみ給水を開始する。この給水により、下部供試体は膨潤し下ピストンが上方に移動することになる。下ピストンはカウンタウェイトによって重量が相殺されているため、上載圧のない条件での膨潤量試験を行っている状況になるが、下ピストンはやがて上ピストンに接することになる。当初設けられるピストン間の隙間は、このように上下ピストンが接するとき、下部供試体の乾燥密度が上部供試体の乾燥密度と同じになるように設けられている。このようにして、異なる応力履歴を経ているものの、同一の乾燥密度を有する二つの供試体が上下に位置することになる。上下ピストンの接着により下部供試体の膨潤変形が生じなくなったことを確認した後に、上部供試体の変形を拘束したまま、上下ピストンをねじ留めして連結する。この状態から、上部と下部の供試体のそれぞれに対して給水を開始する。いずれも変形が拘束されているため、同一の乾燥密度を維持した状態で、各々について独立に膨潤圧試験を実施する状況となる。最後に、下部と上部の供試体に対して設置されているロードセルで計測される荷重（膨潤圧）が平衡に達した後に、上下ピストンの連結を維持したまま、上部供試体の変形拘束を解除する。これによって初めて、上下の供試体の鉛直方向の力のつり合いがとられることになる。変形拘束が解除される前には、上下の供試体は同一の乾燥密度を有しながらも異なる膨潤圧を発生している状態にある。また、給水によって発生した膨潤圧が平衡に達していることから、上下供試体はいずれも飽和状態に至っていると考えられる。このような状態から、変形拘束が解除され、力のつり合いが満足したときに、乾燥密度がどのように変化するかをこの試験では計測している。

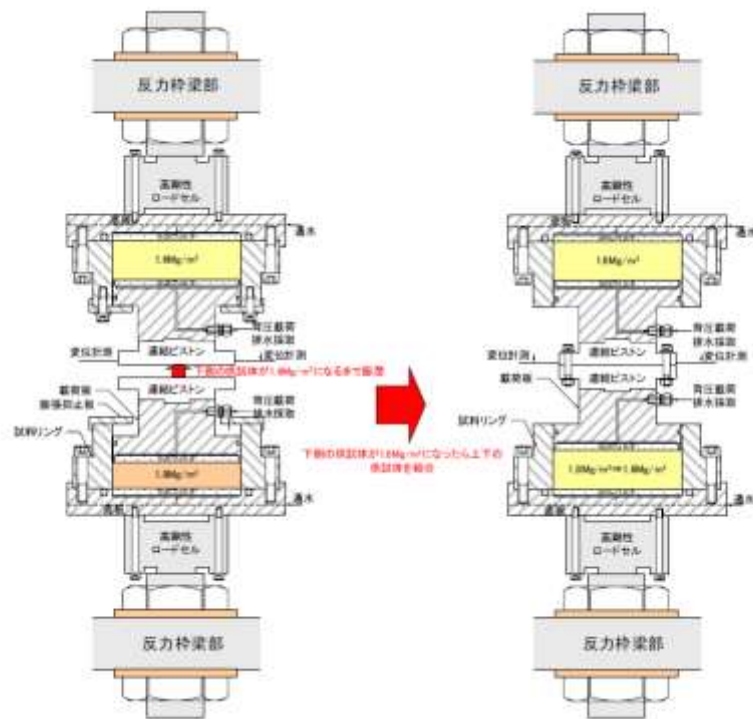


図 6.3.4-1 試験の詳細図[1]

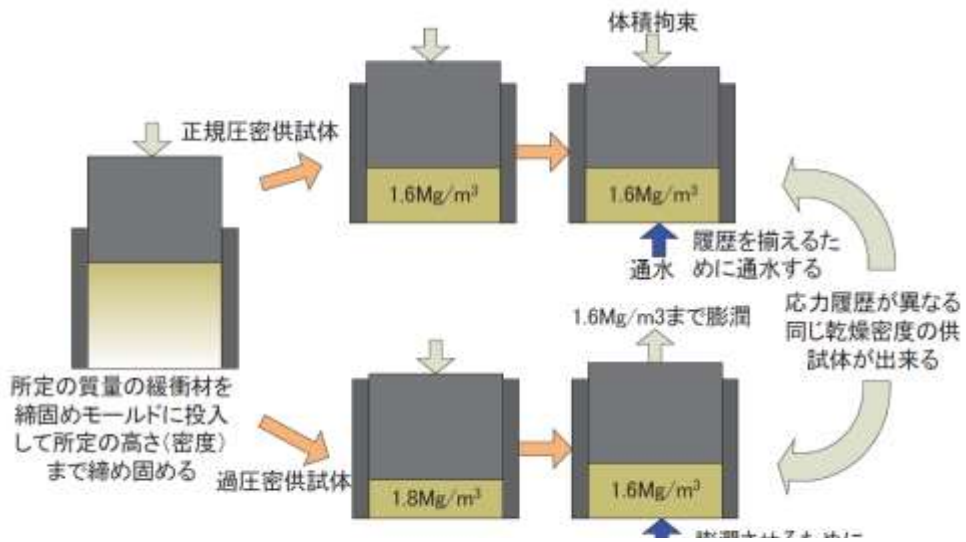


図 6.3.4-2 給水過程の制御プロセス[1]

実施された試験の試験ケースを表 6.3.4-1 にまとめる。表にまとめられるように、高密度供試体と低密度供試体の乾燥密度はそれぞれ 1.8、1.4Mg/m<sup>3</sup>となるように作製されている。これらの乾燥密度を持つ締固め供試体を作製するために、高密度供試体は含水比を一定に保った状態で上載圧を載荷→除荷する応力履歴を与えている。一方、低密度供試体は同じく含水比を一定に保った状態で静的に上載圧を載荷し、その上載圧を除荷することなく、変形を拘束している。したがって、供試体作製時の応力履歴から言えば、高密度供試体は過圧密状態、低密度供試体は正規圧密状態にある。

表 6.3.4-1 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[1]

試験 ケース	高乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	低乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	初期含水比 (%)		給水方法
1	1.794(1.8)	1.589(1.4)	18.97	25.91	流量制御→圧力制御

図 6.3.4-3 に試験から得られた、高密度供試体と低密度供試体の経時変化を示す。まず、過圧密状態にある高乾燥密度の下部供試体に対する給水により、下部供試体が膨潤し、乾燥密度の低下を示している。やがて、上下ピストンが接着することにより下部供試体の膨潤変形が止まり、その乾燥密度は上部供試体のそれと一致する。ここからしばらくは、両供試体とも変形が拘束され、乾燥密度を一定に保った状態で膨潤圧試験と同じような飽和化のプロセスを経る。両供試体の膨潤圧が平衡に達した後、変形の拘束が解除されると、鉛直方向の力のつり合いを満足しながら、下部供試体が収縮（乾燥密度の増大）、上部供試体が膨張（乾燥密度の減少）し、最終的には乾燥密度に差が生じる傾向が見て取れる。

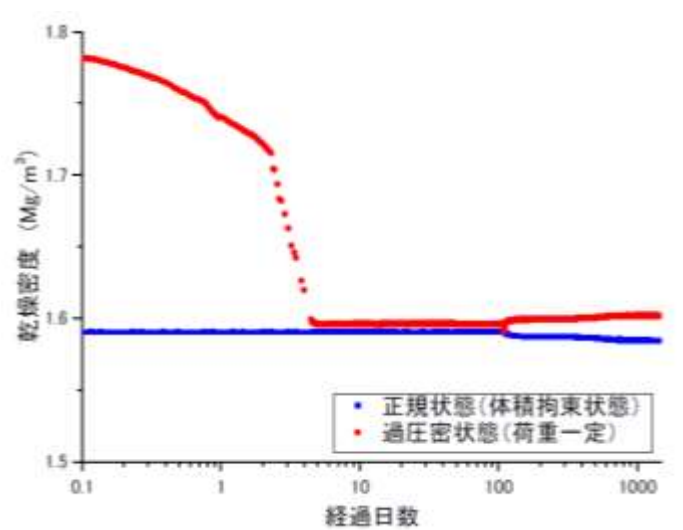


図 6.3.4-3 乾燥密度の経時変化[1]

(2) 解析手法および解析条件

ベントナイト緩衝材の飽和／不飽和化による力学挙動を表現する弾塑性構成モデルは、有効応力の原理および水分特性と連立し、対象とする問題に応じた適切な応力条件・ひずみ条件・含水比条件を課すことにより、要素としての力学応答を記述・解析することができる。ここでは、前節で説明した試験を二要素の連結問題として扱い、試験条件に相当する適切な制約条件を課し、シミュレーションする。ここでも 6.3.3 と同様、6.3.2 の土／水／空気連成問題の支配方程式を踏襲し、以下の仮定を設けた解析を行う。

- 供試体内の不均一性は排除し、各供試体を要素と見做す。要素と見做すことから、応力、ひずみなどの物理量は供試体内に不均一に分布することなく、一つの値で代表されるものとする。
- 飽和状態における完全排水状態と同様、水圧やサクションも供試体内で一つの値を持つ。したがって、この問題は透水係数や透気係数に無関係になる。

以上を踏まえると、一次元問題における各供試体の支配方程式は以下のようにまとめられる。

$$\text{水分特性：} \quad \dot{s} = X_a \dot{S}_e \quad (4.1)$$

$$\text{構成関係：} \quad \begin{Bmatrix} \dot{\sigma}'_a \\ \dot{\sigma}'_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{aa} & 2c_{ar} \\ c_{ra} & 2c_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_a \\ \dot{\epsilon}_r \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} c_a^s \\ c_r^s \end{Bmatrix} \dot{S}_e \quad (4.2)$$

$$\text{有効応力式：} \quad \begin{Bmatrix} \dot{\sigma}'_a \\ \dot{\sigma}'_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{\sigma}_a \\ \dot{\sigma}_r \end{Bmatrix} + s \dot{S}_e \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + s \dot{S}_e \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\text{適合条件：} \quad \dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_a + 2\dot{\epsilon}_r = X_w \dot{w} + X_s \dot{S}_e \quad (4.4)$$

1 要素に対してこの問題を解くとき、解くべき式は 6 本あり、未知数は  $\dot{s}$ 、 $\dot{S}_e$ 、 $\dot{\epsilon}_a$ 、 $\dot{\epsilon}_r$ 、 $\dot{w}$ 、 $\dot{\sigma}'_a$ 、 $\dot{\sigma}'_r$ 、 $\dot{\sigma}_a$ 、 $\dot{\sigma}_r$  の 9 つであるため、9 つの未知数の内、3 つを試験の制約条件あるいは境界条件から既知量として与えて連立方程式を解くことになる。二つの供試体の独立性が保たれるプロセスにおいては、それぞれの供試体について境界条件を定めただえで支配方程式を解けば良いが、連結後のプロセスでは制約条件を課して二要素各々について問題を解かなければならず、解くべき式は  $6 \times 2 = 12$  本、未知数は  $9 \times 2 = 18$  つとなる。したがって、問題を解くための制約条件あるいは境界条件を試験条件から 6 つ定めなければならない。試験手順に照らしプロセス 1～3 に分けて、それぞれのプロセスにおいて課される条件を以下に記す。以降では区別のために、高密度要素に対する物理量には右上に  $H$  を、低密度要素に対する物理量には右上に  $L$  を添え字として付す。

【プロセス 1】

上載圧がない応力条件の下で下部供試体のみ給水を行うプロセスが、プロセス 1 である。上部供試体の変形は拘束され、給水もしないため、何ら状態変化を生じない。したがって、下部供試体のみを考慮の対象とすればよい。プロセス 1 は、下部供試体に対する膨潤量試験と見做すことができ、下部供試体の鉛直応力が一定に保たれていることから次の境界条件が定まる。

$$\dot{\sigma}_r^L = 0 \quad (4.5)$$

また、下部供試体は一次元条件にあるため、側方ひずみが生じないことから次の条件が定まる。

$$\dot{\varepsilon}_r^L = 0 \quad (4.6)$$

これらに加えて下部供試体に対して給水履歴を与えるために、サクシオン制御を考える。

$$\text{サクシオン制御条件：} \quad \dot{s}^L = \bar{s} \quad (<0) \quad (4.7)$$

プロセス1では、式(4.5)および式(4.6)の境界条件の下、下部供試体の乾燥密度が上部供試体の乾燥密度と一致するまで、下部供試体に対して単調にサクシオンを除荷する履歴を与える。

### 【プロセス2】

プロセス2は、下部、上部の供試体それぞれに対する膨潤圧試験と見做すことができ、それぞれの変形を拘束することから次の境界条件が定まる。

$$\dot{\varepsilon}_a^L = \dot{\varepsilon}_r^L = 0 \quad (4.8)$$

$$\dot{\varepsilon}_a^H = \dot{\varepsilon}_r^H = 0 \quad (4.9)$$

これらに加えて上部・下部供試体に対して給水履歴を与えるために、サクシオン制御を考える。

$$\text{下部供試体サクシオン制御条件：} \quad \dot{s}^L = \bar{s} \quad (<0) \quad (4.10)$$

$$\text{上部供試体サクシオン制御条件：} \quad \dot{s}^H = \bar{s} \quad (<0) \quad (4.11)$$

プロセス2では、両供試体のサクシオンが消失し飽和状態に至るまで、単調にサクシオンを除荷する履歴を与える。

### 【プロセス3】

プロセス3は、上下供試体の鉛直方向の力のつり合いを満足し、両供試体の体積の和を一定に保った上で、両供試体の変形（膨潤・収縮）を許容するプロセスである。上部・下部供試体はいずれも一次元条件にあるため、側方変形は生じず、次の境界条件が与えられる。

$$\dot{\varepsilon}_r^H = \dot{\varepsilon}_r^L = 0 \quad (4.12)$$

また、両供試体の体積和が一定であり、片方に膨潤ひずみが生じれば、もう片方に同じ分だけ収縮ひずみが生じることから、次の制約条件が定まる。

$$\dot{\varepsilon}_a^H + \dot{\varepsilon}_a^L = 0 \quad (4.13)$$



このプロセスでは、変形拘束を解除した瞬間からピストンを介して上下供試体の鉛直方向の力のつり合いが満足し、両供試体の鉛直応力が常に一致することになる。変形拘束を解除する前には、両供試体にそれぞれ異なる鉛直応力（＝膨潤圧）が作用しており、変形拘束の解除と同時に両供試体の鉛直応力に変化が生じる。この変化は力学的な応答として現れるものであり、予め値を知ることができないが、排水条件の下で飽和した両供試体にこのような鉛直応力の変化が生じることから、鉛直応力が不定の圧密現象が両供試体に生じるものと考えられる。すなわち、変形拘束が解除された瞬間において生じる鉛直応力変化は両供試体内部の過剰間隙水圧の発生を促し、時間の進展に伴って、過剰間隙水圧の消散と有効応力変化、そして体積変化が生じる。最終的には、両供試体の過剰間隙水圧が完全に消散し、両供試体の鉛直方向の全応力と有効応力の両方が一致することになる。以上を勘案するに、このプロセスは両供試体が飽和状態を維持する条件の下で鉛直方向の有効応力が一致する状態に向かうプロセスと捉えることができる。よって、式(4.1)から式(4.4)の支配方程式に対して、次のような条件を課す。

$$\dot{s}^H = \dot{s}^L = 0 \quad (4.14)$$

$$\dot{\sigma}_a^L = \overline{\dot{\sigma}_a^L} \quad (4.15)$$

式(4.14)は、両供試体の飽和状態を維持するために設けた条件であり、プロセス3の初期にサクシオンがすでに消失しており飽和状態に至っていれば、水分特性の性質より、常に飽和状態を与える制約となる。式(4.15)は下部供試体の鉛直方向の有効応力変化を与えるものであり、下部と上部の鉛直方向有効応力が一致するまで繰り返し、増分応力として与えるものとする。

解析条件を表 6.3.4-2 に示す。実験と同じく、高乾燥密度の下部供試体と低乾燥密度の下部供試体の初期の乾燥密度をそれぞれ 1.8Mg/m<sup>3</sup>、1.6Mg/m<sup>3</sup> している。初期含水比（あるいは、初期飽和度）の影響を比較するために、初期含水比の組み合わせを3通りに設定した。

解析で用いた材料パラメータを表 6.3.4-3 にまとめる。これらのパラメータは、前章で用いたものと同様であり、高密度要素と低密度要素は同じ材料からなることから、材料パラメータも全く同じ数値を用いている。

初期応力状態は、次のように仮定した。まず、高乾燥密度供試体と低乾燥密度乾燥密度供試体に対して、表 6.3.4-2 に整合する初期飽和度を求める。次に、低乾燥密度供試体について、水分特性の主吸水曲線上に初期状態があるように初期サクシオンを仮定する。また、高乾燥密度供試体も低乾燥密度供試体と同じ初期サクシオンを持つものと仮定する。いずれの供試体についても、初期の全応力がゼロであると仮定し、サクシオンと有効飽和度の積から定まるサクシオン応力と等価な初期有効応力を設定した。

表 6.3.4-2 解析条件

解析 ケース	高乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	低乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	初期含水比 (%)		給水方法
CASE1	1.8	1.6	5	5	圧力制御
CASE2	1.8	1.6	10	5	圧力制御
CASE3	1.8	1.6	15	5	圧力制御

表 6.3.4-3 各パラメータの値

パラメータ	記号	数値
土粒子比重	$G_s$	2.707
圧縮指数	$\lambda$	0.140
膨潤指数 (最乾燥時)	$\kappa_0$	0.010
膨潤指数 (飽和時)	$\kappa_{sat}$	0.139
限界応力比	$M$	0.500
ポアソン比	$\nu'$	0.450
Se-hardening モデルパラメータ	$a$	100.000
Se-hardening モデルパラメータ	$n$	1.000
下負荷面パラメータ	$m$	0.000
EC モデルパラメータ	$n_E$	1.800
水分特性 (吸水) パラメータ	$A_w$	-2.000
水分特性 (吸水) パラメータ	$B_w$	3.000
水分特性 (脱水) パラメータ	$A_D$	-6.000
水分特性 (脱水) パラメータ	$B_D$	3.000
残留飽和度	$S_{r0}$	0.100
膨潤指数変化パラメータ	$l$	10.000
基準間隙比	$e_{ref}$	0.750
基準先行圧	$p'_{ref}$	2.000

### (3) 解析結果

図 6.3.4-4 から図 6.3.4-6 に、CASE1～CASE3 の一連の給水過程における乾燥密度変化を示す。赤線が高密度要素、青線が低密度要素の経路を示している。プロセス1は、高密度要素に対して膨潤量試験を行っている状況にあり、低密度要素の乾燥密度に一致するまで、給水に伴って膨潤変形を呈することにより乾燥密度が低下する傾向にある。初期含水比が小さい（飽和度が小さい）CASE1 では、給水の初期段階で吸水圧縮（コラプス）が生じ乾燥密度が一旦増加するが、その後、膨潤変形に転じて乾燥密度が低下する傾向を示している。プロセス2では、体積一定条件下で高密度・低密度供試体の両方に給水を行うため、ここに示す図上では乾燥密度が一定となることが分かるのみである。プロセス3では、鉛直方向の全応力のみならず有効応力が一致するまで、高密度要素と低密度要素の圧密（排水／吸水）が進行する。いずれのケースについても、この圧密の進行により乾燥密度差が生じる結果を示しており、図 6.3.4-3 に示した試験結果と同様、高密度要素が収縮（乾燥密度の増加）、低密度要素が膨潤（乾燥密度の低下）する傾向にある。

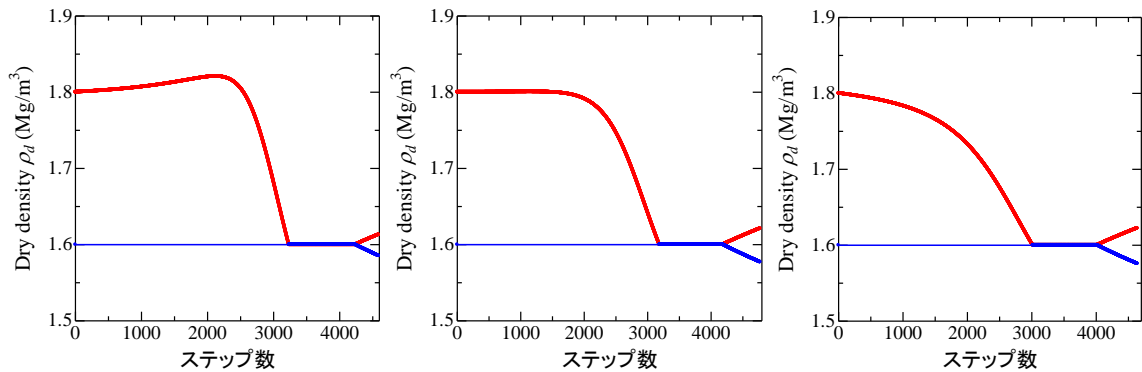
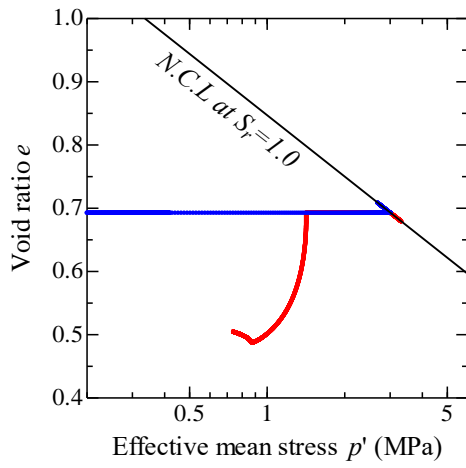
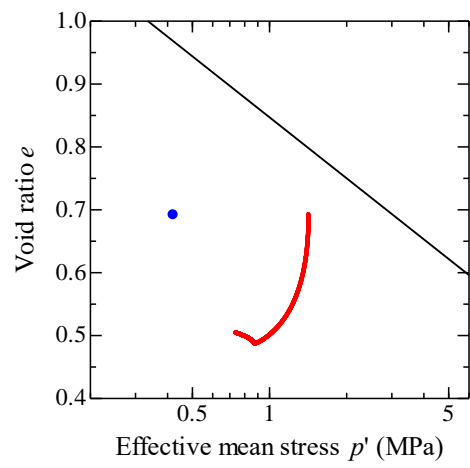


図 6.3.4-4 乾燥密度変化 (CASE1)    図 6.3.4-5 乾燥密度変化 (CASE2)    図 6.3.4-6 乾燥密度変化

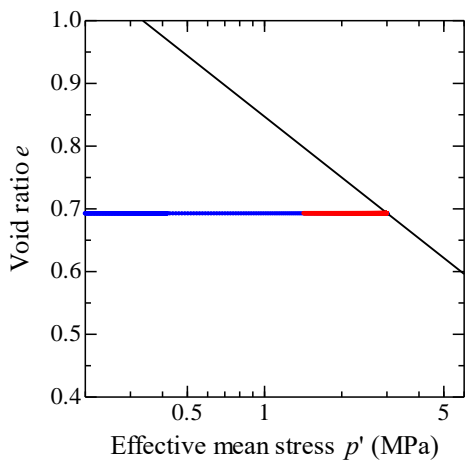
図 6.3.4-7 から図 6.3.4-9 に、CASE1～CASE3 の間隙比－平均有効応力関係を示す。(a)が全プロセスの間隙比－平均有効応力関係であり、(b)から(d)にはそれぞれプロセス1から3の関係を抜粋して示している。高密度要素と低密度要素がそれぞれ独立に給水作用を受けるプロセス1とプロセス2を経て、両要素は飽和状態に至る。この解析で用いている構成モデルは、飽和状態において間隙比と平均有効応力が一対一に与えられるものであり、プロセス2の最終状態では両要素の間隙比（乾燥密度）は一致することから平均有効応力も同値となる。しかし、後述のように、この時点において鉛直方向の有効応力は高密度要素と低密度要素で異なる値にあり、この不均衡が次のプロセス3での変形をもたらすことになる。鉛直方向の有効応力の不均衡を解消するために、幾何学的な制約条件式 (4.13) を満足しつつ、いずれの要素も完全飽和線上を推移し、間隙比の差が生じている。



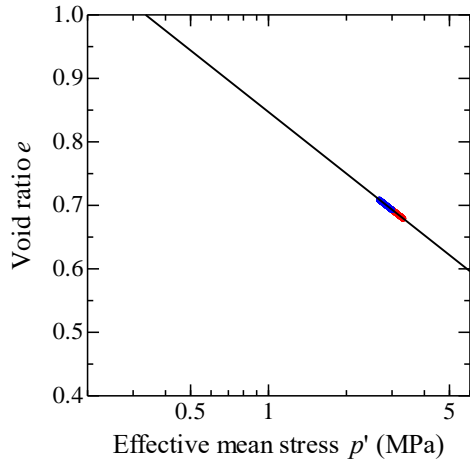
(a) 全プロセス



(b) プロセス 1

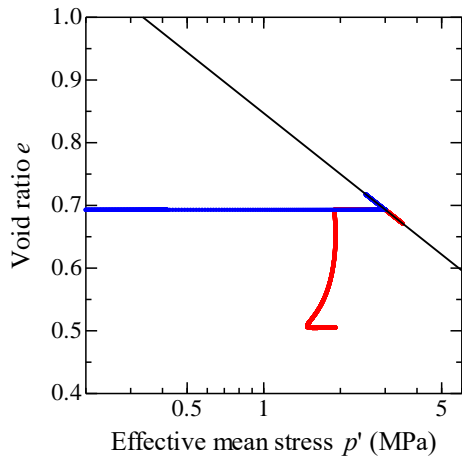


(c) プロセス 2

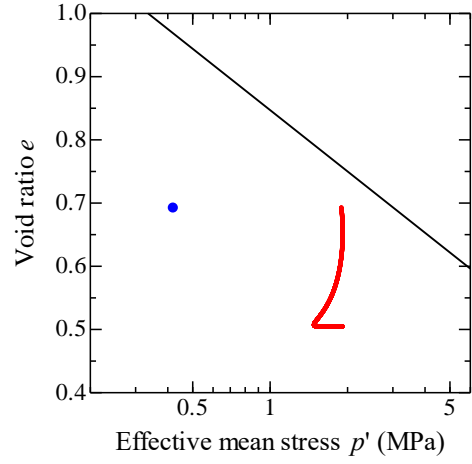


(d) プロセス 3

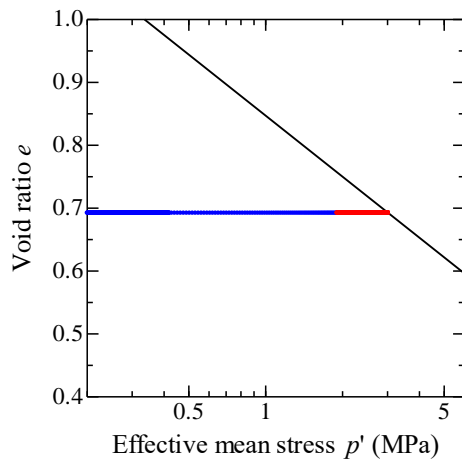
図 6.3.4-7 間隙比—平均有効応力関係 (CASE1)



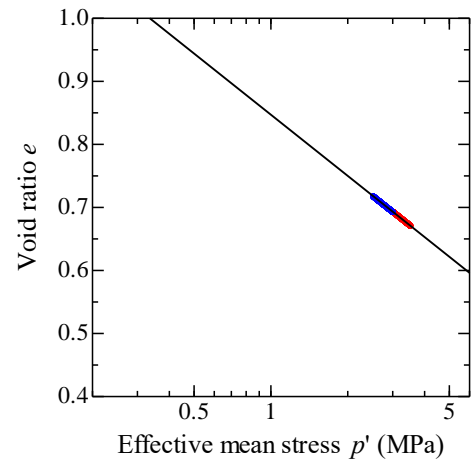
(a) 全プロセス



(b) プロセス 1

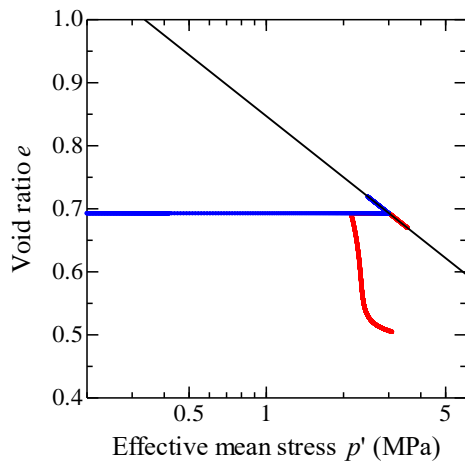


(c) プロセス 2

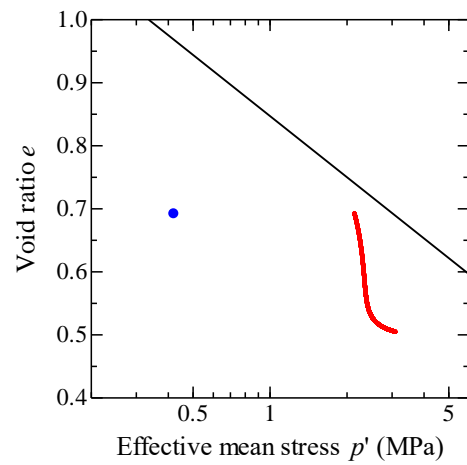


(d) プロセス 3

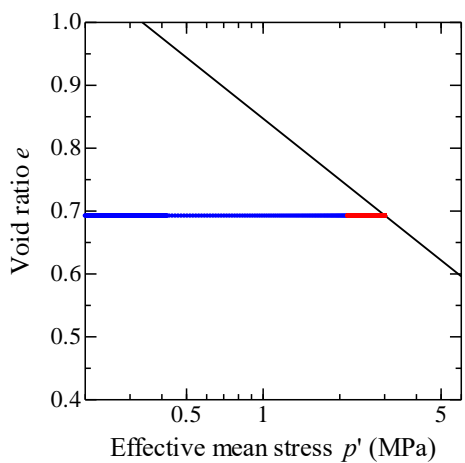
図 6.3.4-8 間隙比—平均有効応力関係 (CASE2)



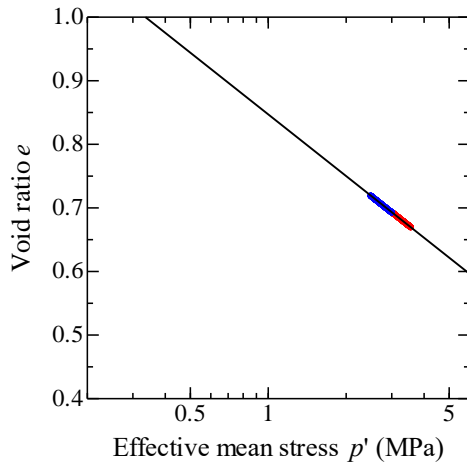
(a) 全プロセス



(b) プロセス 1



(c) プロセス 2



(d) プロセス 3

図 6.3.4-9 間隙比-平均有効応力関係 (CASE3)

図 6.3.4-10 から図 6.3.4-12 に、CASE1～CASE3 の応力経路 (全応力および有効応力の経路) を示す。図中、実線は全応力経路、点線は有効応力経路を示しており、それぞれ軸方向と側方向の応力成分の変化として経路を示している。また、(a)が全プロセスの間隙比-平均有効応力関係であり、(b)から(d)にはそれぞれプロセス 1 から 3 の関係を抜粋して示している。プロセス 1 では、高密度要素の吸水膨潤が進行する。サクシオン低下によるサクシオン応力の変化が有効応力変化をもたらすと同時に、鉛直応力一定下での一次元変形挙動であることから、鉛直応力と水平応力に差が生まれ異方応力状態に推移している。プロセス 2 では、両要素について変形を拘束した状態で給水が進行する。サクシオン応力の変化によって全応力と有効応力の変化がもたらされるが、

サクシオン応力が等方応力であるため、軸差応力変化が生じない等方的な応力変化となる。プロセス3では、鉛直方向の有効応力が一致するまで両要素に応力変化が生じる。一次元変形であるため、低密度要素も最終的に異方応力状態に至るが、水平応力が鉛直応力を若干上回る程度であり、ほとんど等方応力状態にあると見て良い。低密度要素はプロセス3において、除荷過程にあることから、このような異方応力の程度はポアソン比に支配される。

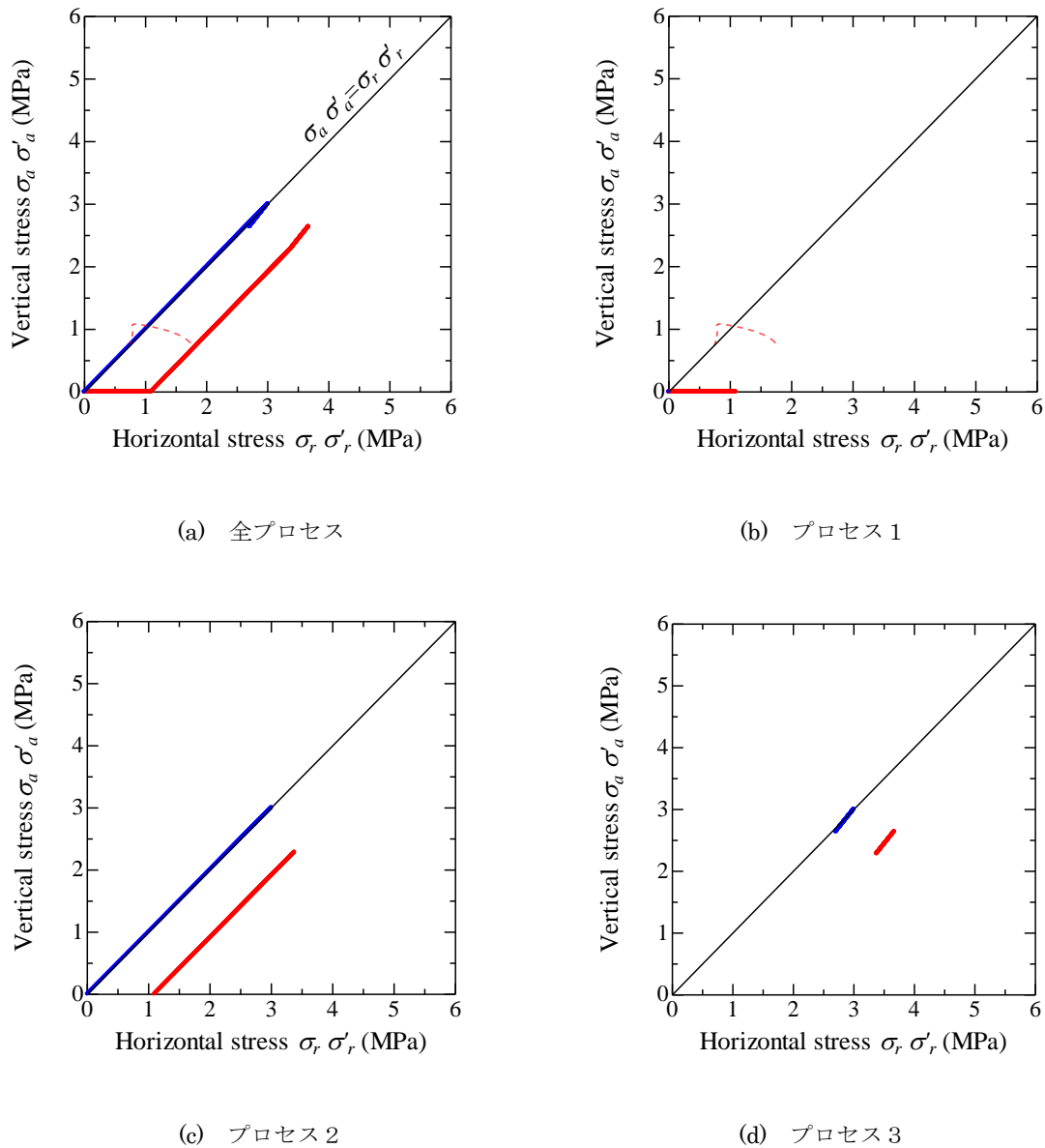
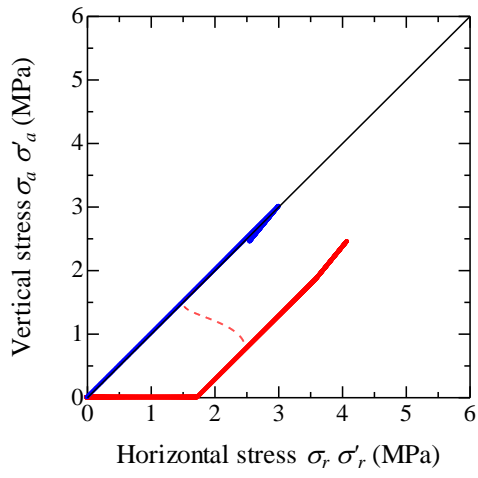
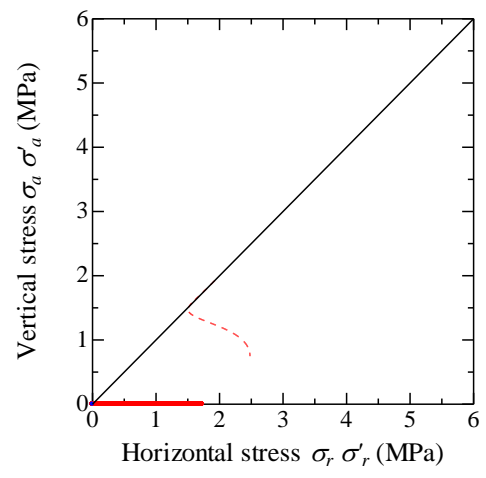


図 6.3.4-10 応力経路 (CASE1)

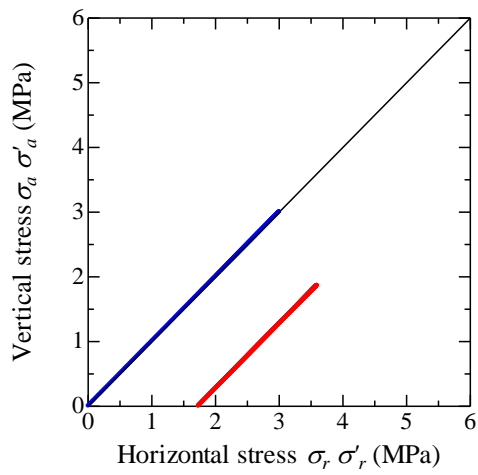




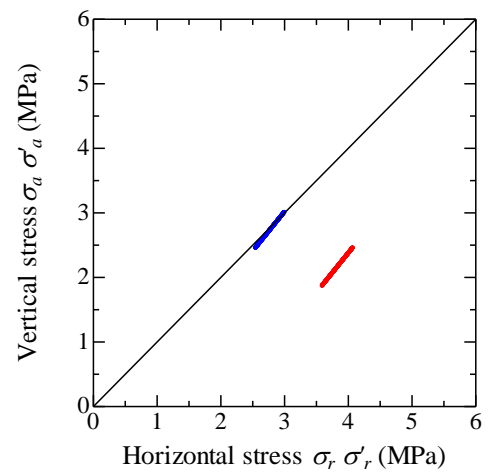
(a) 全プロセス



(b) プロセス 1

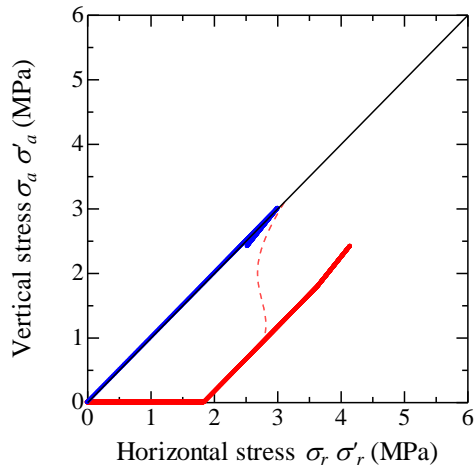


(c) プロセス 2

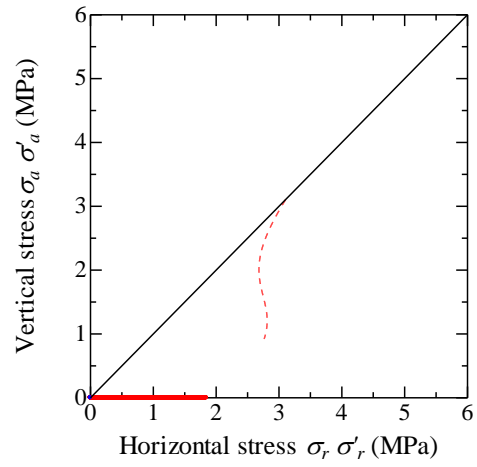


(d) プロセス 3

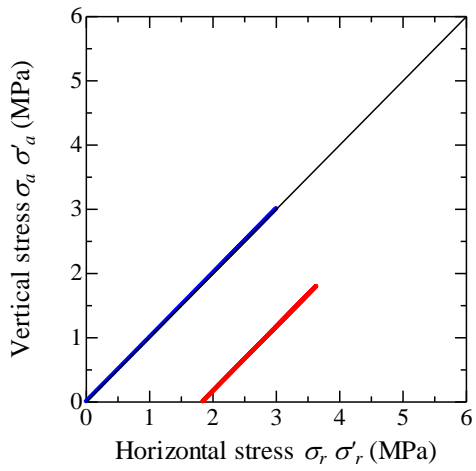
図 6.3.4-11 応力経路 (CASE2)



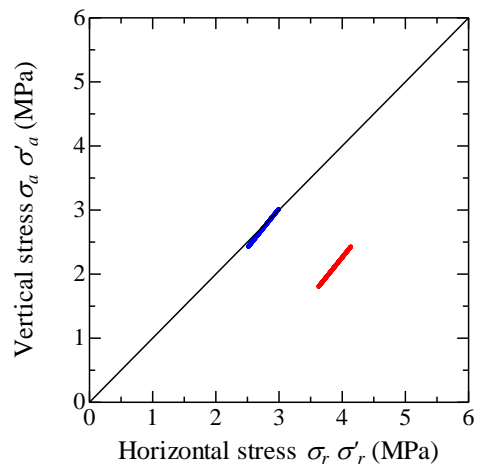
(a) 全プロセス



(b) プロセス 1



(c) プロセス 2



(d) プロセス 3

図 6.3.4-12 応力経路 (CASE3)

### 6.3.5 長尺ベントナイト供試体の浸潤試験シミュレーション

#### (1) 試験の概要と結果

一次元浸潤速度取得試験装置を図 6.3.5-1 に示す。緩衝材として使用した材料は、クニゲル V1 に愛知県産のケイ砂 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。供試体は、極力、密度分布が生じないように仕上がり層厚 5mm、乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  となるように撒き出して、静的締固めを 200 回繰り返すことで高さ 1m、直径 5cm の長尺供試体を作製している。浸潤フロントの移動は比抵抗の変化によって計測されている。注水はフローポンプで一方方向、一次元に浸潤させている。底面からの位置を  $d(\text{mm})$ 、経過時間を  $t(\text{day})$  とすると、浸潤フロントの近似関数が  $d=27.8t^{0.477}$  で表わされることを示している。ここで、浸潤フロントとは飽和度が 41%まで上昇した点（初期飽和度は 38.7%）を連ねたものとしている。

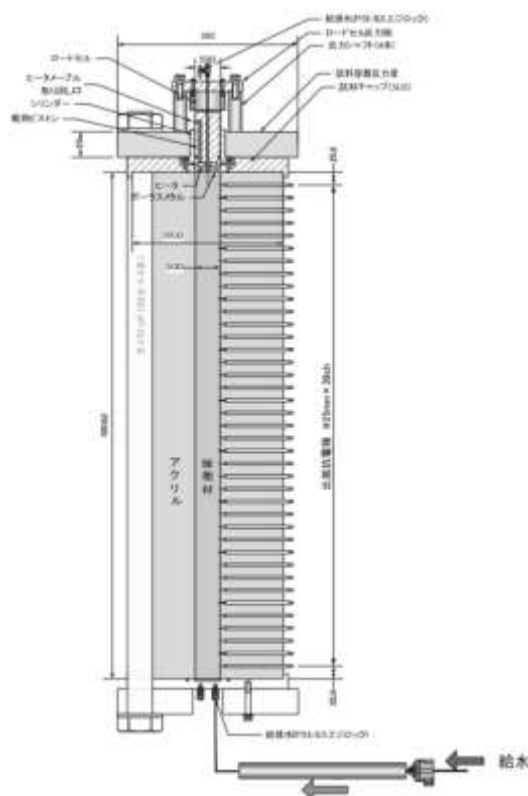


図 6.3.5-1 長尺ベントナイトの一次元浸潤速度取得試験の試験装置概要（再掲）

#### (2) 解析手法および解析条件

解析に用いた不飽和透水係数モデル・不飽和透気係数モデルを示す。クニゲル V1 のようなベントナイト材料に対して、比透水係数や比透気係数を求めた実験データが極めて少ないので、本研究では、Mualem の不飽和透水係数推定モデル[文献]と VanGenuchten の透気係数式[文献]を用いる。これらの関数も出るから導かれる不飽和透水係数と不飽和透気係数は、

$$K_W = k_W k_{rw} = k_W S e^{\frac{1}{2}} \left[ 1 - \left( 1 - S e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (6.3.5-1)$$

$$K_a = k_a k_{ra} = k_a (1 - S_e)^{\frac{1}{2}} \left( 1 - S e^{\frac{1}{m}} \right)^{2m} \quad (5-2)$$

で表される。ここで、 $K_W$ ：不飽和透水係数、 $k_W$ ：透水係数、 $k_{rw}$ ：比透水係数、 $K_a$ ：不飽和透気係数、 $k_a$ ：透気係数、 $k_{ra}$ ：比透気係数、 $m$ ：Mualem 定数である。

解析領域、境界条件は図 6.3.5-2 のように設定した。Mualem 定数の違いが浸潤フロント、また供試体内の飽和度分布、サクシオン分布に与える影響について検討した。透気係数については、既往の研究を基に決定する。透気係数  $k_a$  は、

$$k_a = \frac{k \rho_w g}{\eta_a} \quad (5-3)$$

であり、 $k$ ：絶対浸透率 ( $\text{m}^2$ )、 $\eta_a$ ：気体の粘性係数 ( $\text{Mg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ) である。絶対浸透率は透過媒体の構造特性に由来する透過抵抗係数であり媒体固有の値であるため、通常水とガスの絶対浸透率は同じ値になる。しかしベントナイトの場合、乾燥状態と飽和状態では間隙構造が大きく異なるため、水とガスの絶対浸透率は約 5 桁違う[18]。図 6.3.5-3 は乾燥状態にあるクニゲル V1 及び珪砂を 30% 混ぜたクニゲル V1 の絶対浸透率 ( $\text{m}^2$ ) である[19]。温度 20°C における空気の粘性係数を  $1.822 \times 10^{-8} \text{Mg}/(\text{m} \cdot \text{s})$  として透気係数を算出すると図 6.3.5-4 のようになる。透気係数は  $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-6}$  ( $\text{m}/\text{s}$ ) の間に存在することがわかる。本研究では、乾燥密度  $1.6 \text{Mg}/\text{m}^3$  における珪砂が 30% 混ざったクニゲル V1 の透気係数である  $1.61 \times 10^{-5} \text{m}/\text{s}$  を代表値として用いることとする。

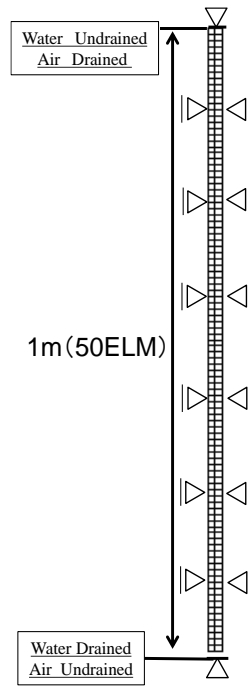


図 6.3.5-2 解析条件

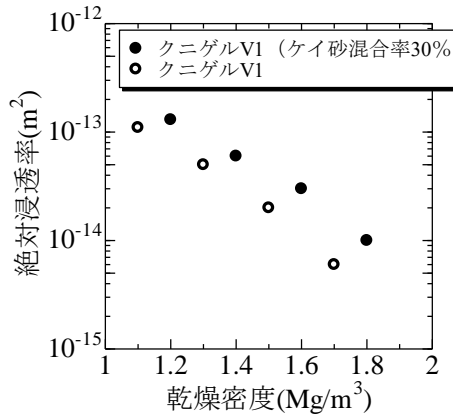


図 6.3.5-3 絶対浸透率 (m²) [文献]

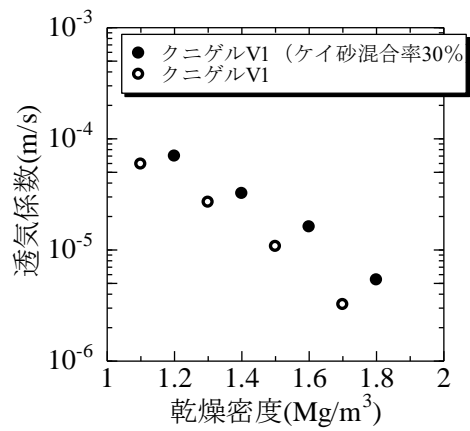


図 6.3.5-4 透気係数(m/s)

ここでは、Mualem 定数が浸潤フロント、また供試体内の飽和度分布、サクシオン分布に与える影響について検討する。解析に用いたパラメータを表 6.3.5-1 に示す。解析ケースを表 6.3.5-2 表 6.3.3-2 解析条件に示す。初期サクシオンは 2 ケース設定し、Mualem 定数は  $m=1.0$  と  $3.0$  の 2 つについて解析を行う。解析に用いる水分特性曲線、比透水係数を図 6.3.5-5、図 6.3.5-56 に示す。

表 6.3.5-1 材料パラメータ

$\lambda$	$\kappa_0$	$l$	$\nu'$	$n$	$a$	$k_a(\text{m/day})$
0.14	0.01	10	0.45	1	20	1.39
$n_E$	$M$	$S_{r0}$	$A_W$	$B_W$	$A_D$	$B_D$
1.8	0.5	0.1	-11	1.6	- 37	4.2

表 6.3.5-2 解析ケース

	初期サクション	Mualem 定数
CASE1-1	4.0MPa	3.0
CASE2-1	6.0MPa	3.0
CASE1-2	4.0MPa	1.0
CASE2-2	6.0MPa	1.0

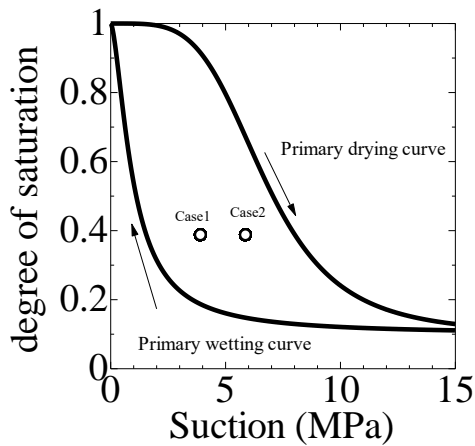


図 6.3.5-5 解析に用いた水分特性曲線

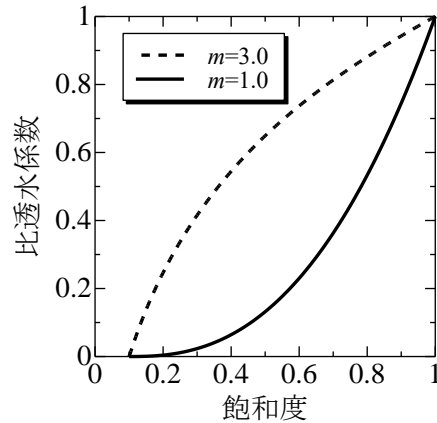


図 6.3.5-6 比透水係数

(3) 解析結果

解析から得られた浸潤フロントを図 6.3.5-7 に示す。図を見ると、Mualem 定数が大きな値を用いた方が不飽和透水係数は大きくなるため、浸潤フロントは早く到達していることがわかる。また、初期サクション値が大きな方が、境界下端にかかる全水頭との差が大きくなり、より大きな導水勾配が生まれるため、浸潤フロントの到達が早くなっている。

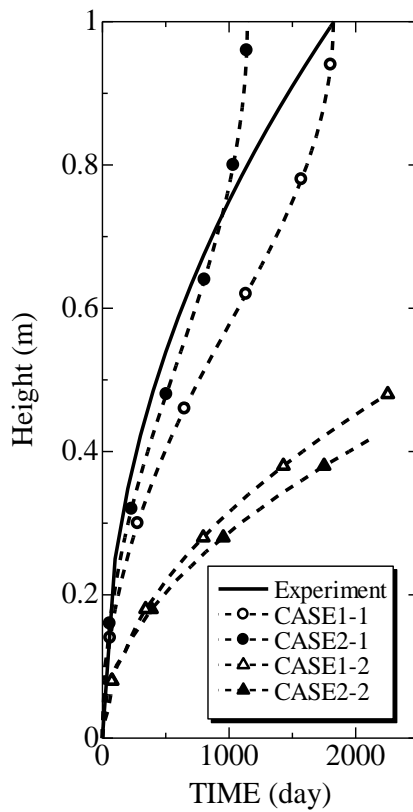


図 6.3.5-7 浸潤フロントの形成

次に、解析から得られた供試体内の飽和度分布、サクシヨン分布の結果を示す。図より、**Mualem** 定数が大きな値を用いた方が不飽和透水係数は大きくなるため、供試体上部でも飽和度の上昇が見られ、サクシヨンの減少量も大きくなっている。また、初期サクシヨン値が大きな方が、境界下端にかかる全水頭との差が大きくなり、より大きな導水勾配が生まれるため、飽和度の上昇速度が速く、サクシヨンの減少量も大きくなっている。



CASE1-1

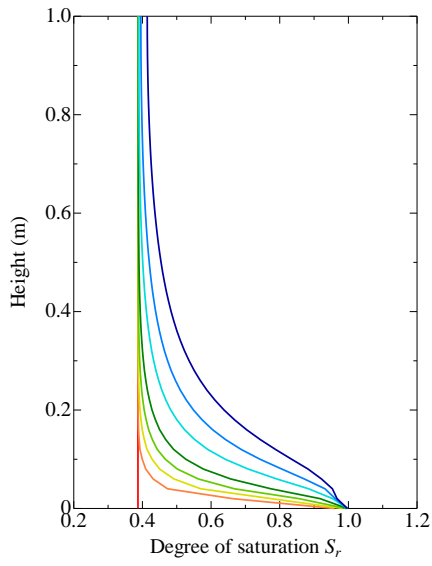


図 6.3.5-8 供試体内飽和度分布

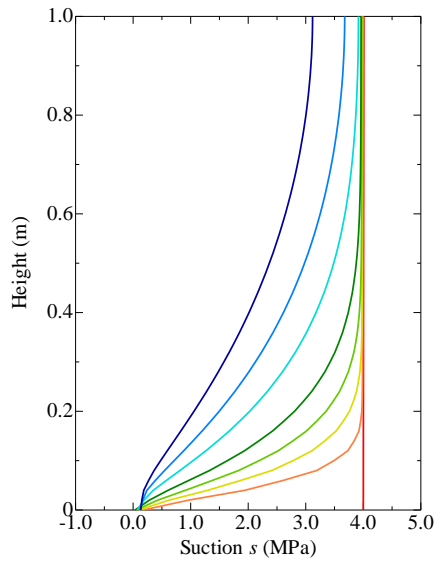
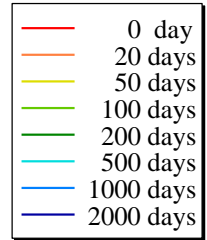


図 6.3.5-9 供試体内サクション分布



CASE2-1

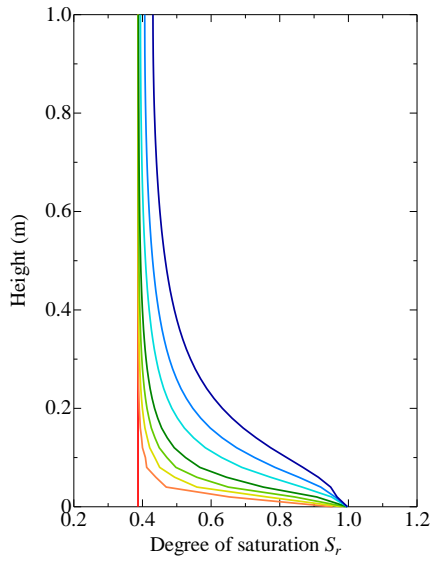


図 6.3.5-10 供試体内飽和度分布

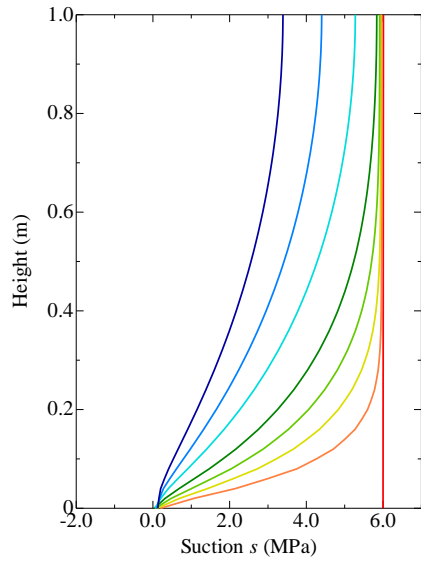
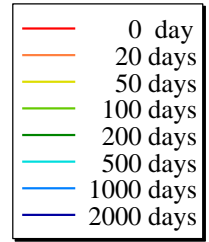


図 6.3.5-11 供試体内サクション分布



CASE1-2

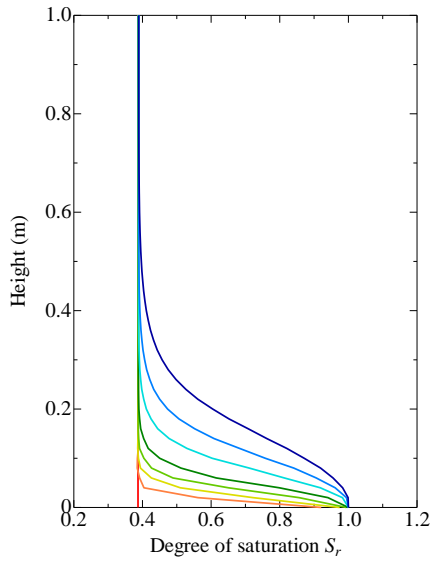


図 6.3.5-12 供試体内飽和度分布

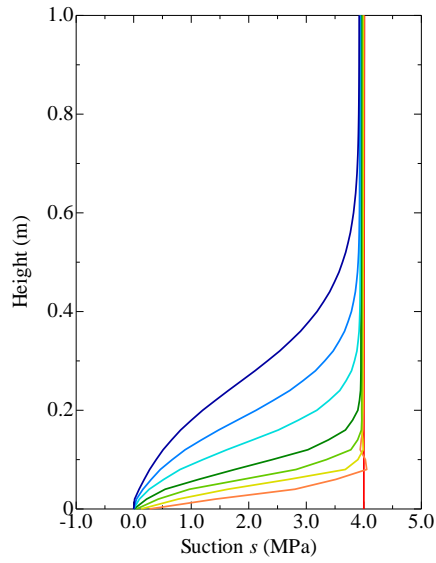
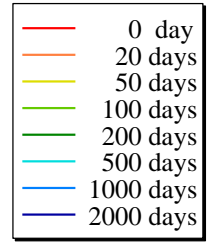


図 6.3.5-13 供試体内サクシオン分布



CASE2-2

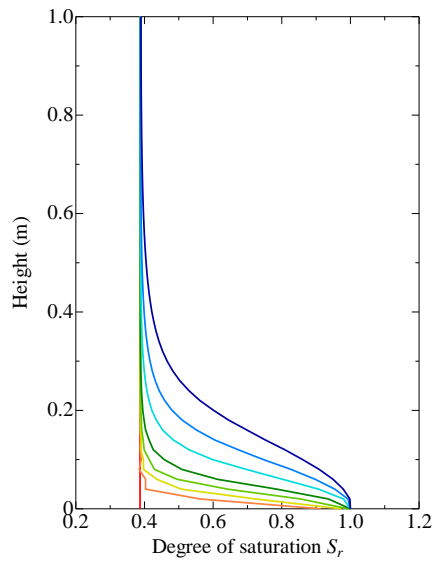


図 6.3.5-14 供試体内飽和度分布

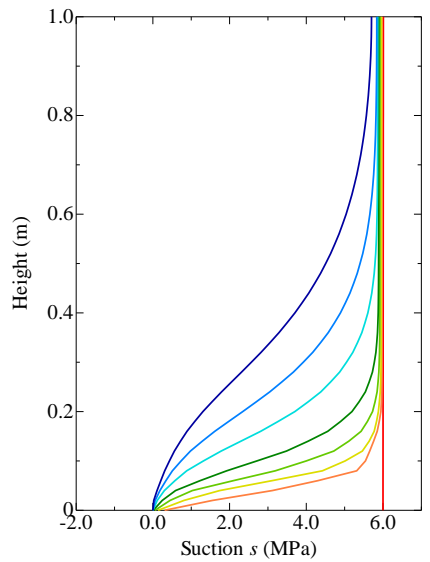
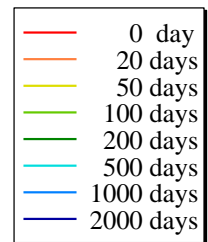


図 6.3.5-15 供試体内サクシオン分布



### 6.3.6 まとめ

本研究では、過去に実施されたベントナイト緩衝材の室内試験を対象とし、再冠水過程の緩衝材の状態を予測するための力学解析手法の検証を行った。シミュレーションの対象とした試験は、「密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響試験」、「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」及び「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」であり、ベントナイト緩衝材の不飽和弾塑性構成モデルと **Cozeny-Karman** 則を用いた不飽和透水モデルの適用性について、ケーススタディを実施した。

6.3.3 で実施した「密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響試験」のシミュレーションでは、直列に配置された乾燥密度の異なる二つ供試体が力のつり合いを満足しながら吸水過程を経て飽和状態に至るとき、二つの供試体の乾燥密度差が解消することなく残留するという実験事実を解析シミュレーションでも表現できることが示された。6.3.4 で実施した「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」のシミュレーションでは、乾燥密度が同一となった二つの供試体であっても、その乾燥密度を実現するに至る応力履歴が異なっていれば応力の再配分によって新たな変形が生じ、乾燥密度の差がもたらされるという実験事実を解析シミュレーションでも表現できることが示された。いずれの解析シミュレーションにおいても、このような密度差を表現するにあたっては、飽和化過程で変化する側方応力を構成関係に陽な形で考慮に入れることが重要であることが示唆された。

6.3.5 では、「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」のシミュレーションを行い、試験結果から得られる浸潤フロントに注目しながら、不飽和透水係数に影響を及ぼす **Mualem** 係数と初期サクション値について、ケーススタディを実施した。試験より得られる浸潤フロントの経時変化を概ね良好に表現できる **Mualem** 係数と初期サクション値の組み合わせが同定された。

## 6.4 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—

### 6.4.1 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。SKBで行った試験を対象にした解析結果の例示とともに、本事業の中で行っている室内試験を対象として同一の解析ツールを使用した解析を行った。

### 6.4.2 SKBで行った試験を対象とした解析

During the last years two large scale tests has been done in order to investigate what happens to the buffer during the installation time. During this time a hot canister will be in contact with the buffer which will cause water redistribution in the buffer due to the thermal gradient. The water redistribution will in change the volume of the material which can cause the buffer blocks to crack. It is important to ensure that this cracking is not so large that it will affect the dismantling of auxiliary equipment like drainage pumps. The upwards swelling should not be so large that the installation of the backfill blocks will be affected either.

Modelling has been used both as a help for design of the test and to help in the evaluation of the result. When it comes to the design of the test it has been used to pinpoint interesting areas were to put sensors and to estimate the influence of different designs for the test.

When it comes to the evaluation of test results modelling has been an excellent tool to explain results and to test hypotheses on which processes that dominates in the system. The large scale tests are usually very complex with a lot of processes going on such as convection in air filled slots, inflow from the rock, water vapour transport due to the thermal gradient and hydraulic transport in the porous material. It is not always easy to estimate which function that is dominating. Even though boundary conditions are difficult to get completely right modelling gives a good understanding of which process is dominating and this helps to get an idea of what can have caused unexpected data from the test.

As an example was that during one of these tests the vertical expansion of the buffer was bigger the first expected and when water content was measured after the test it was noted that the water content had increased between the solid blocks and the ring shaped blocks. It was suspected that this could be caused by hot air leaking from the slot

between the canister and buffer out to the slot between the buffer and the rock. This could then be tested in modelling and the results could be replicated which suggested that the theory of air leaking between the inner slot and the outer is probably the correct one, see 図 6.4.2-1. This has increased SKB's understanding of the early THM processes and influenced SKB's choice of installation method sequence.

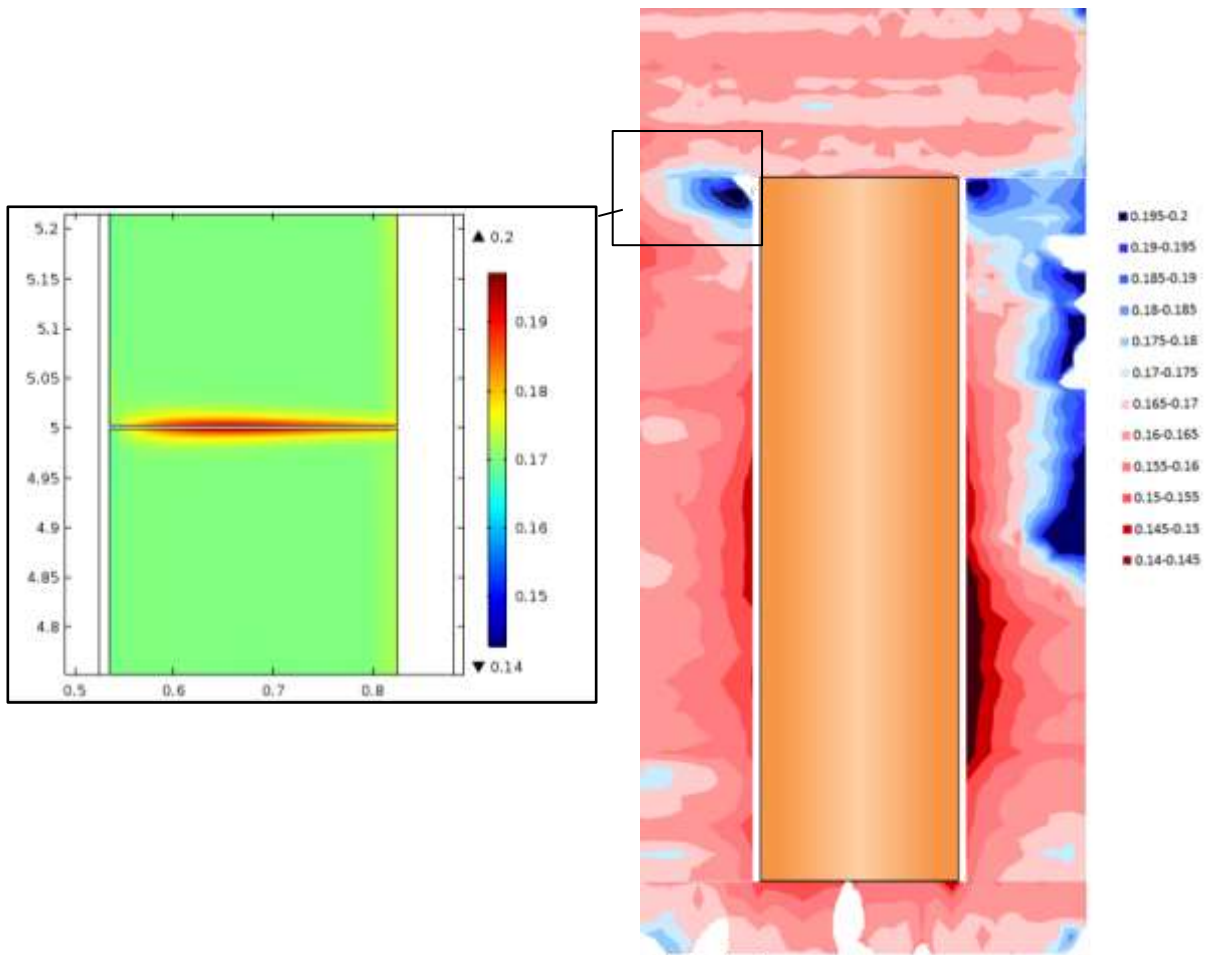


図 6.4.2-1 Measured water content in the test to the right where the increased water content between the blocks are clearly seen. To the left modelled water content with a leakage of air between the block.

#### 6.4.3 一次元浸潤試験のモデリング

(SKB's modelling of RWMC's laboratory test on evaluation of seepage rate)

In order to illustrate how modelling can be used to predict and evaluate experimental result, modelling of one of RWMC's laboratory tests (seepage rate see 図 6.4.3-1) have been done by SKB. Modelling is normally more helpful in more complex tests where a lot of processes are taking place and competing against each other but in this case a simple example has been chosen, the seepage test. It has been chosen because it has defined boundary conditions and it is expected that water transport through porous material is the dominating transport

mechanism. The modelling is intended to show the principles rather than to exactly predict the correct result of the test. Since some data regarding Kunigel V1 was uncertain, data from MX-80 used to compare the results from the modelling.

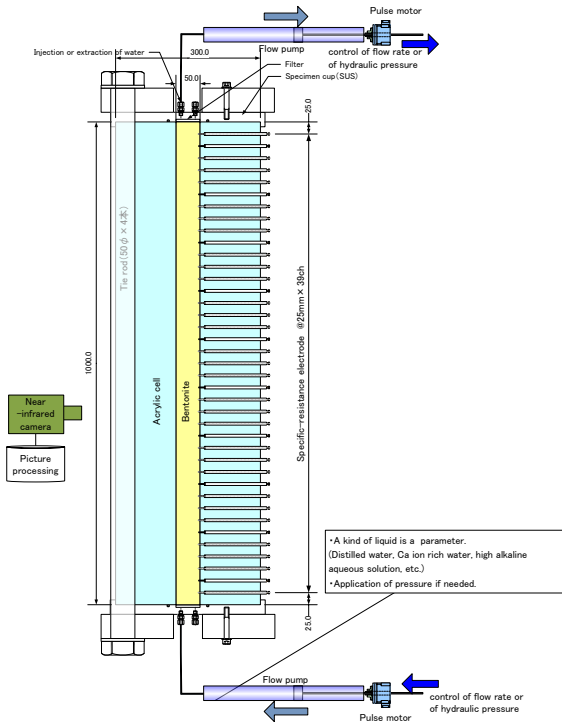


図 6.4.3-1. Drawing showing the seepage test apparatus (再掲、図 3.1.1-2 と同じ)

(1) 構成式と境界条件

The modelling has been done in Comsol Multiphysics which is a commercial FEM program designed to handle coupled physics. The test has a setup which makes it possible to describe with a one dimensional model, with one side having a constant pressure and the other side having a no flux boundary according to 図 6.4.3-2.

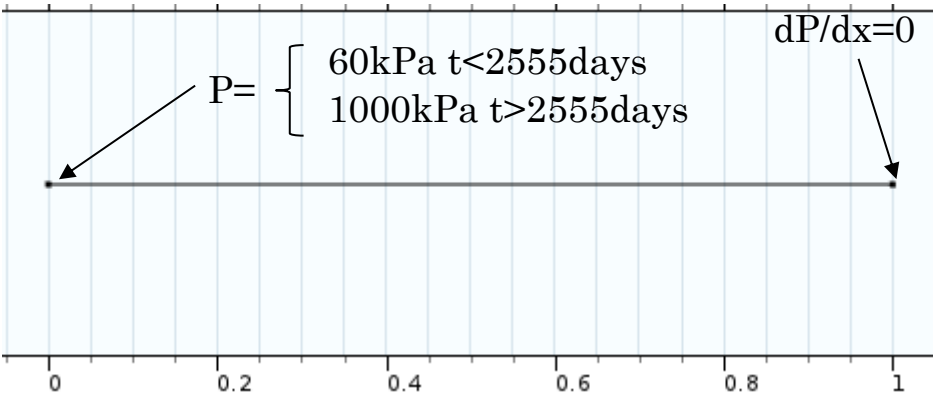


図 6.4.3-2. Geometry and boundary condition.

The equation use to describe water transport in this case is the Richards equation, Eq 1.

$$\frac{C_m}{g} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( -\rho \kappa_r \kappa_s \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 0 \quad \text{Eq.1}$$

Were  $C_m$  is the specific moisture capacity defined according to Eq.2,  $\kappa_r$  is relative permeability which is defined in Eq. 3,  $\kappa_s$  is saturated permeability and  $P$  is pressure,  $t$  is time,  $x$  is distance and  $g$  is the gravitational acceleration.

$$C_m = \begin{cases} \frac{d\theta}{dh}, & \theta > \theta_s \\ 0, & \theta < \theta_s \end{cases} \quad \text{Eq. 2}$$

Were  $h$  is hydraulic head and  $\theta$  is the volumetric water content.

$$\kappa_r = S_r^3 \quad \text{Eq. 3}$$

Were  $S_r$  is the degree of saturation.

In the case were diffusion of water vapour is taken in consideration it is described with the diffusion equation, Eq.4.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla(-D\nabla c) = Q \quad \text{Eq 4}$$

Were  $Q$  is the same variable as in Eq.1 and it is described according to Eq.5.

$$Q = \frac{(133e^{\frac{0.018p}{\rho_w RT}} * 10^{8.07131 - \frac{1730.63}{233.426 + T - 273.15}})}{RT} - c \quad \text{Eq.5}$$

Were  $\rho_w$  is the density of water,  $R$  is the ideal gas constant and  $T$  is temperature (in Kelvin).

## (2) 物性値

To be able to calculate the water distribution in the test the retention curve is needed. For MX-80 Eq 6 seems to work well. How the expression compares to measured values for MX-80 and Kunigel can be seen in 図 6.4.3-3 and 図 6.4.3-4.

$$w = \frac{a}{(1-Rh)} + bRh + 0.035wf - 0.035 \quad \text{Eq.6}$$

Were  $a$  and  $b$  is fitting constants  $Rh$  is relative humidity which can be recalculated to suction



( $P$ ) with the Kelvin equation, Eq 7,  $wf$  is a function which control the hysteresis effect, i.e. the difference in suction between wetting and drying. In this case were only wetting takes place and therefore  $wf$  can be considered to be constant. In this modelling the value for  $wf$  is -1 for MX-80 and -3.28 for Kunigel which are determined by fitting to data.

$$P = \frac{RT\rho}{0.018} \ln(Rh) \tag{Eq 7}$$

The retention curve compared with data can be seen in Fig 6.4.3-3. The difference between data and Eq. 3 at low water content is normally taken care of with the hysteresis function  $wf$  but in this case there is no need to that because water content will never be so low in this test.

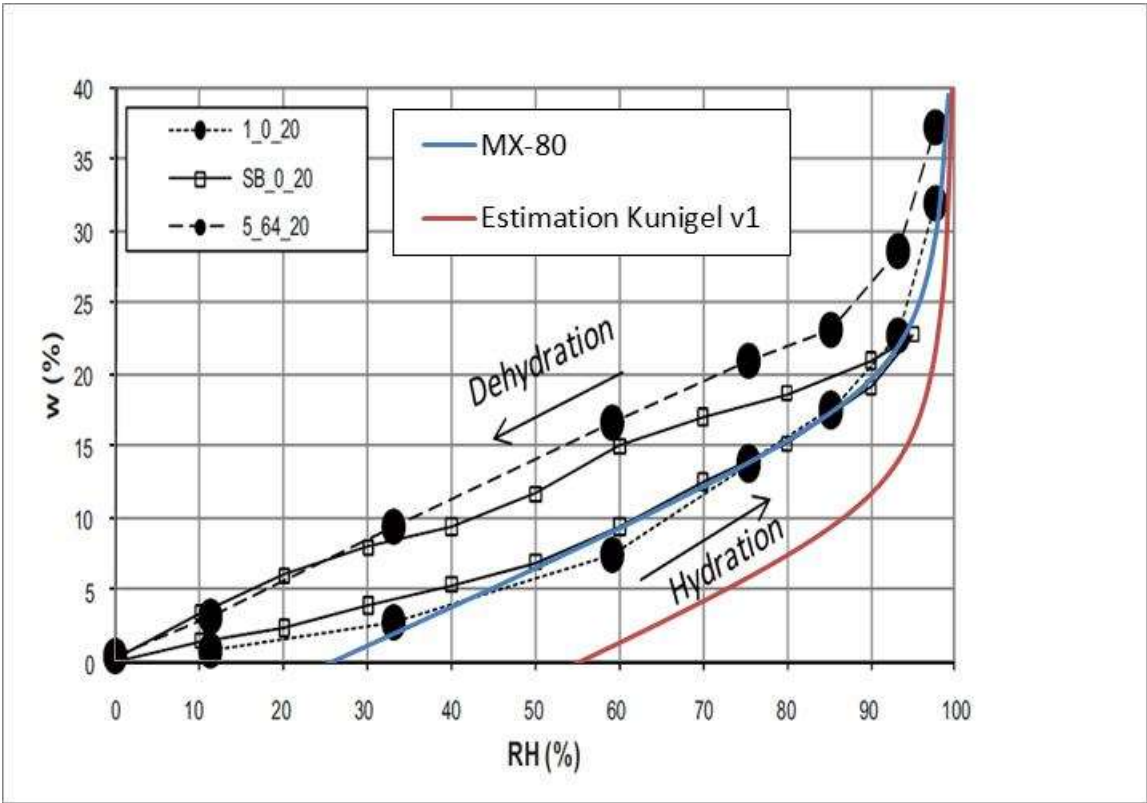
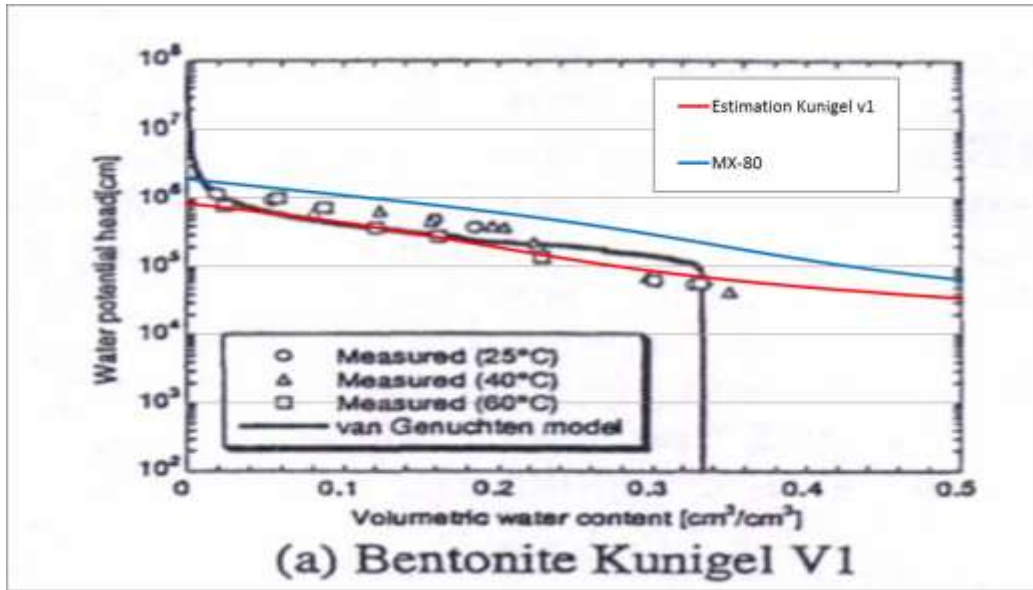


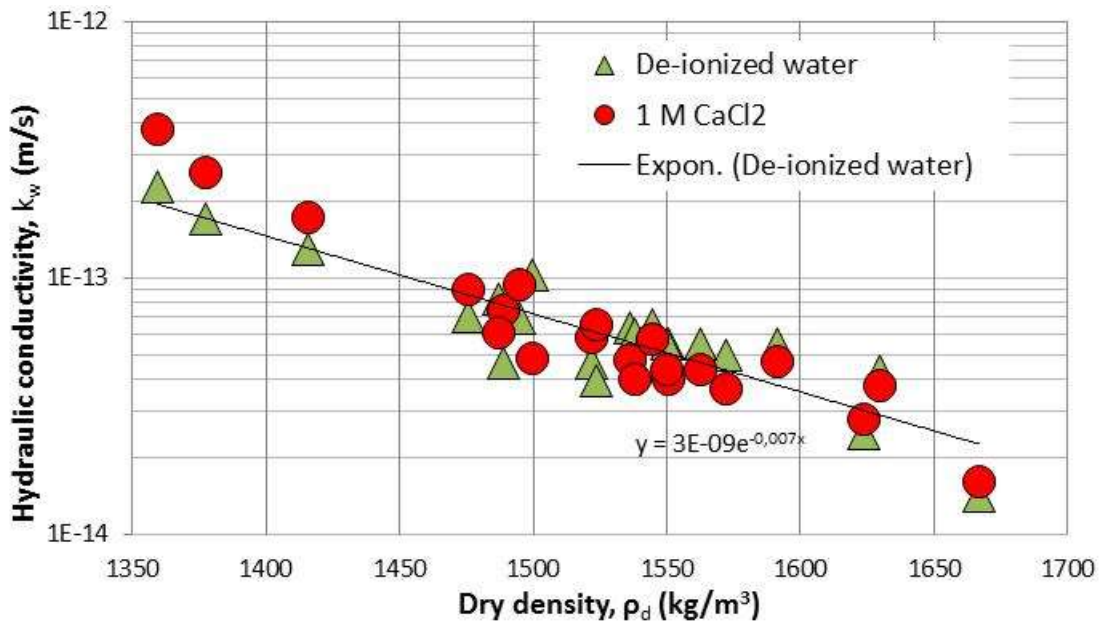
Fig 6.4.3-3. Measured values for MX-80 compared to Eq 6. Data taken from (Åkesson et al 2010)[23].

To estimate the retention curve for Kunigel V1 data taken from the book “Hydromechanical and thermohydromechanical behaviour of deep argillaceous rock – theory and experiments” and is shown in Fig 6.4.3-4 together with the curves used in modelling.



☒ 6.4.3-4 Kunigel data taken from literature compared to Eq 6

The permeability can be calculated from the hydraulic conductivity which has been measured for MX-80 and data is shown in ☒ 6.4.3-5.



☒ 6.4.3-5 Hydraulic conductivity measured for MX-80 (TR-16-15 to be published).

(3) 結果

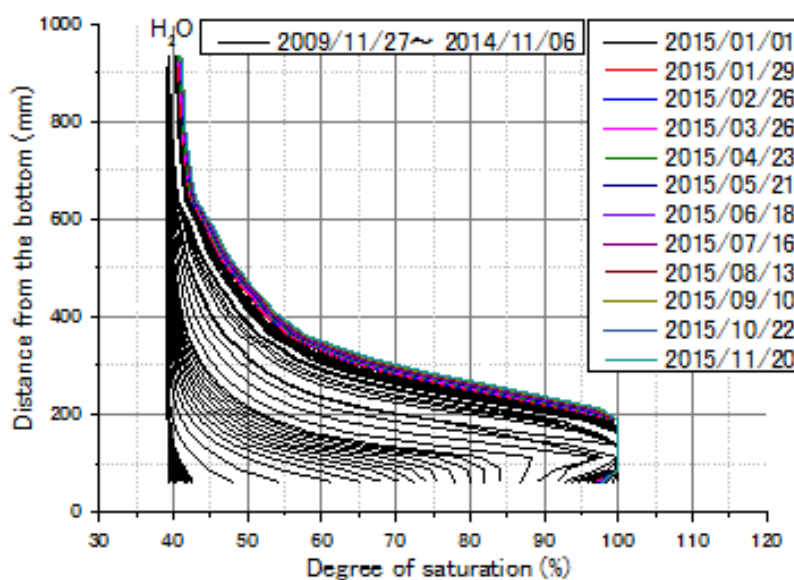
The calculations were made for both MX-80 and Kunigel data. Since the permeability was not known for Kunigel this parameter was fitted against the saturation front measured after 6 years, see ☒ 6.4.3-6. This resulted in a permeability or hydraulic conductivity for Kunigel that was approximately 3 times higher than that for MX-80. A comparison between modelling with

MX-80 data and Kunigel data after 7 years can be seen in 図 6.4.3-7. In 図 6.4.3-8, predicted result for different times can be seen for Kunigel parameters. In 図 6.4.3-9 the seepage front shown compared to empirical expressions fitted from data. In this case the definition of the seepage front is a 1 percent unit increase in saturation and the definition of the saturation front is when the saturation reaches 99%. The modelling follows the empirical expressions for the saturation front rather well. The modelled seepage front moves slightly slower than the empirical one and that is most likely because vapour diffusion has not been considered which would increase the water transport in the unsaturated zone.

## Seepage test

2016

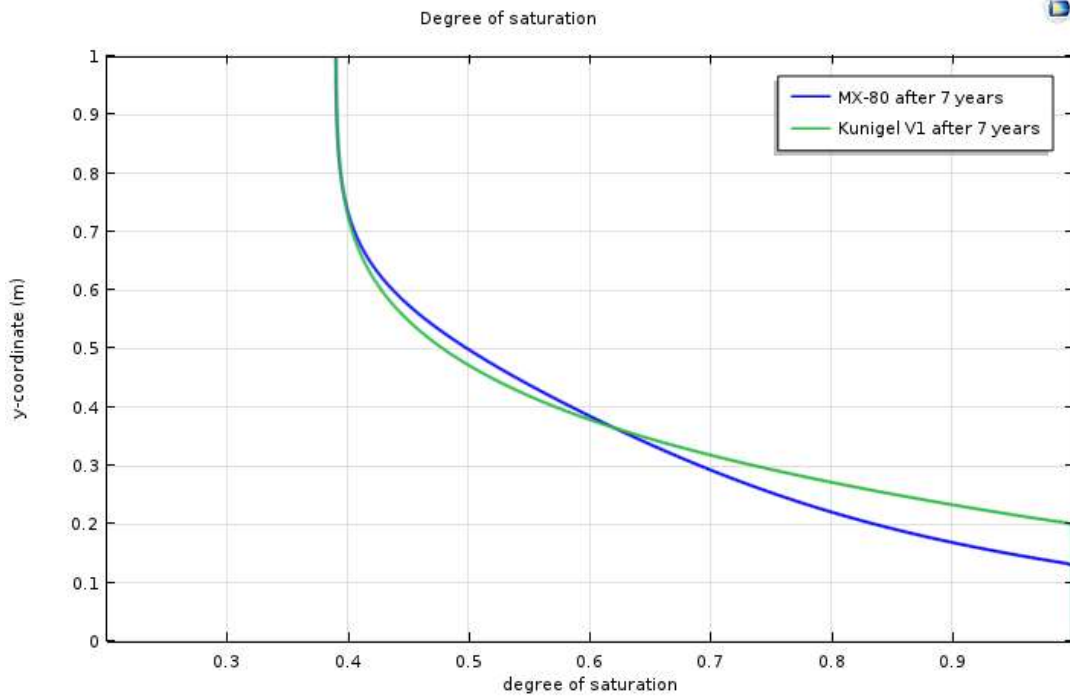
The 14th meeting on the saturation of bentonite



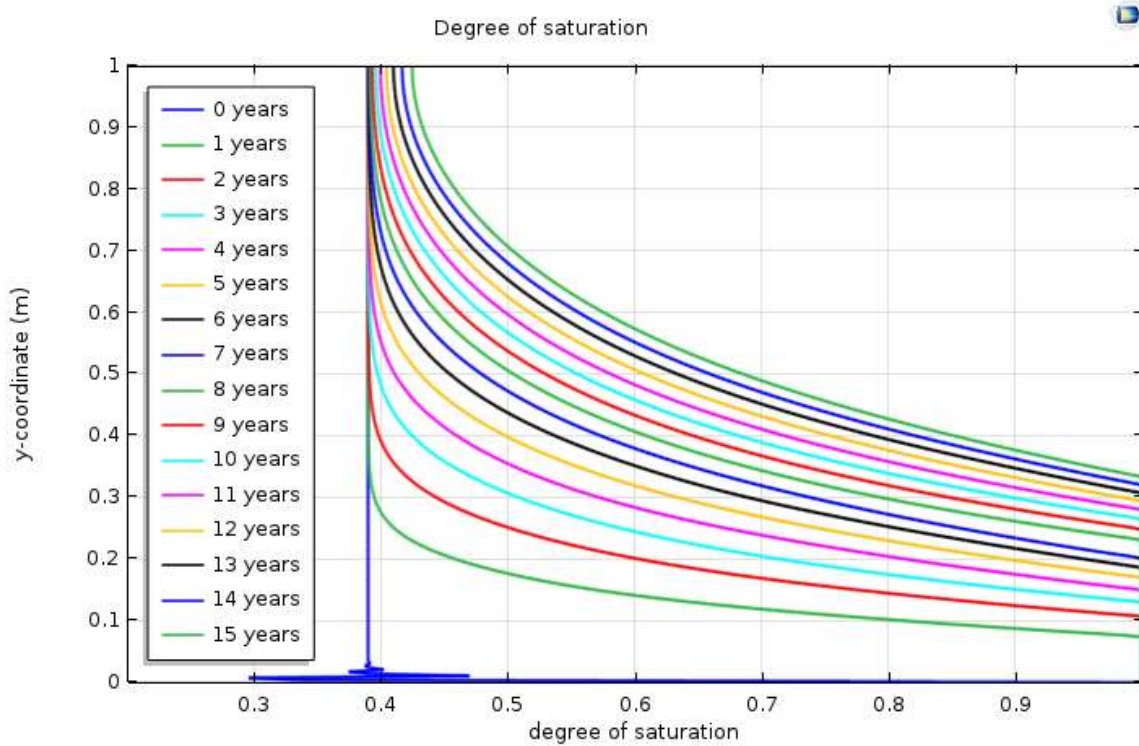
SKB, RWMC and KAJIMA

7

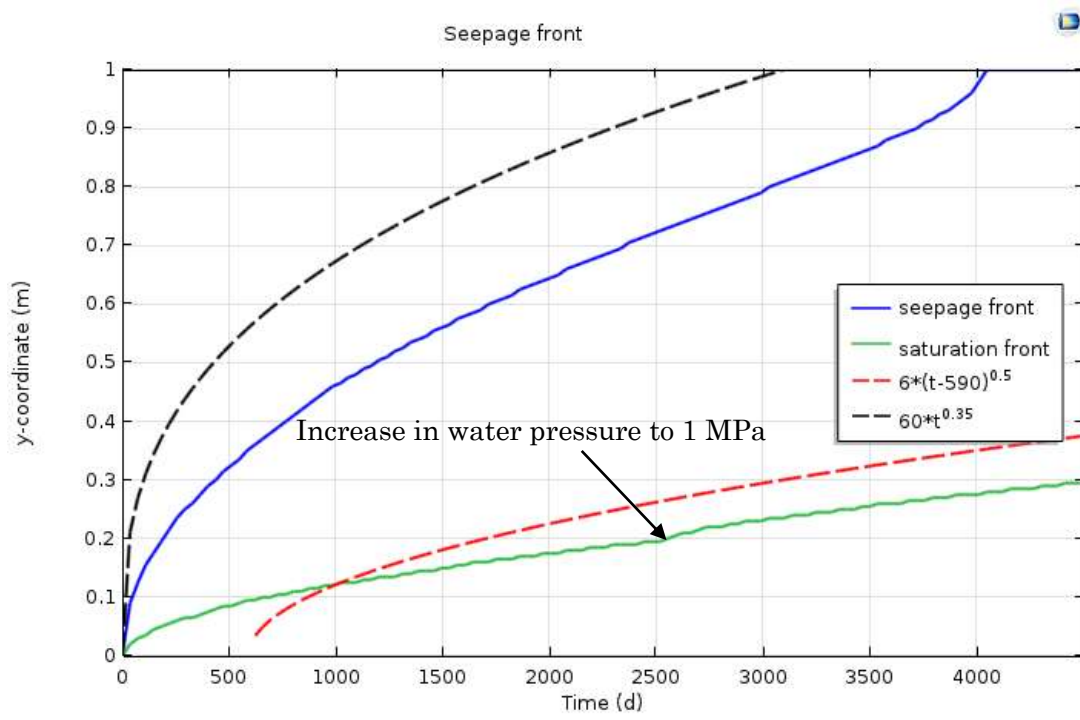
図 6.4.3-6 Results from seepage test, degree of saturation (図 3.1.1-7 上の図と同じ).



☒ 6.4.3-7 Comparison of the modelled degree of saturation between MX-80 data and Kunigel data for permeability and retention properties.

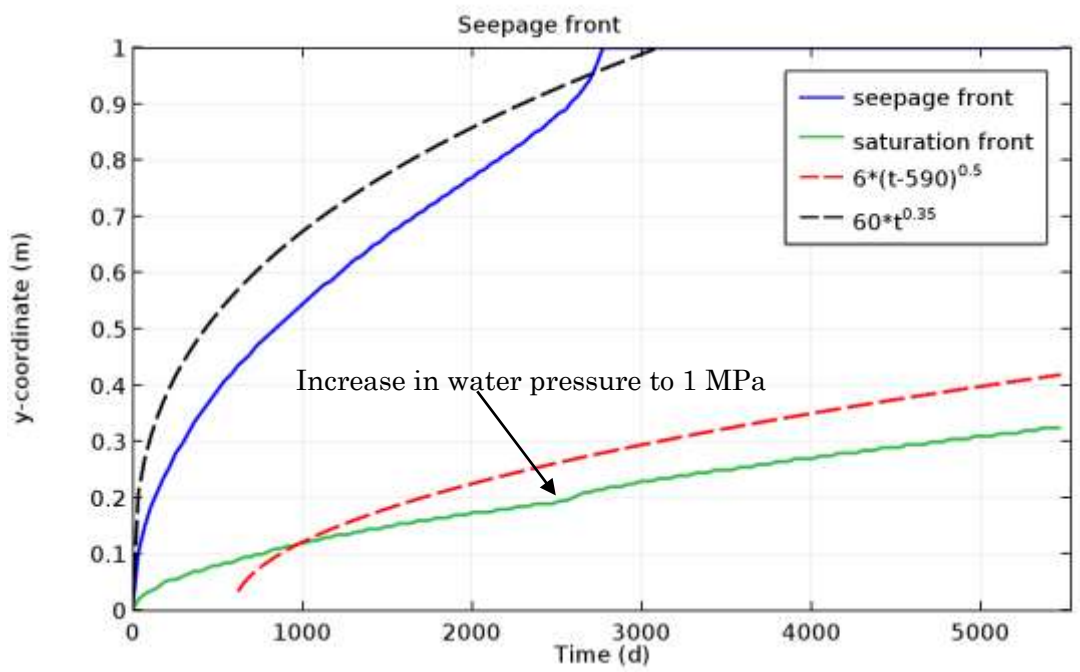


☒ 6.4.3-8 Predicted Saturation of the test at different times from start up to 15 years after start.



☒ 6.4.3-9 Modelled Seepage front and saturation front compared to empirical expressions (Note that water vapour diffusion is not considered here).

To try and get closer to the measured values diffusion of water vapour is added to the model. The result is shown in ☒ 6.4.3-10 and shows that the seepage front reaches the top of the test after approximately 2,500 days.



☒ 6.4.3-10 Modelled Seepage front and saturation front compared to empirical expressions when water vapour diffusion is taken into account.

## 第6章 参考文献

- [1] 原子力発電環境整備機構:NUMO ワークショップ資料, 2016.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] SKB:RD & D Programme, 2013.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Pattersson, S.:SKB R&D work on low-pH cementitious materials for a geological repository, 2007.
- [8] Eriksson, M., Lindström, L.:KBS-3H post-grouting Mega-Packer test at -220m level at Äspö HRL, SKB Report R-08-42, 2015.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] (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).
- [17] (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/>

- [18] 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).
- [19] 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).
- [20] (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）
- [21] SKB 社：KBS-3H Complementary studies 2008–2010, *Technical Report TR-12-01* (2012).
- [22] (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
- [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.

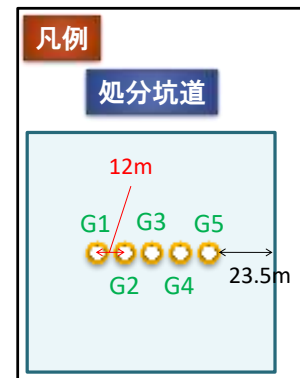


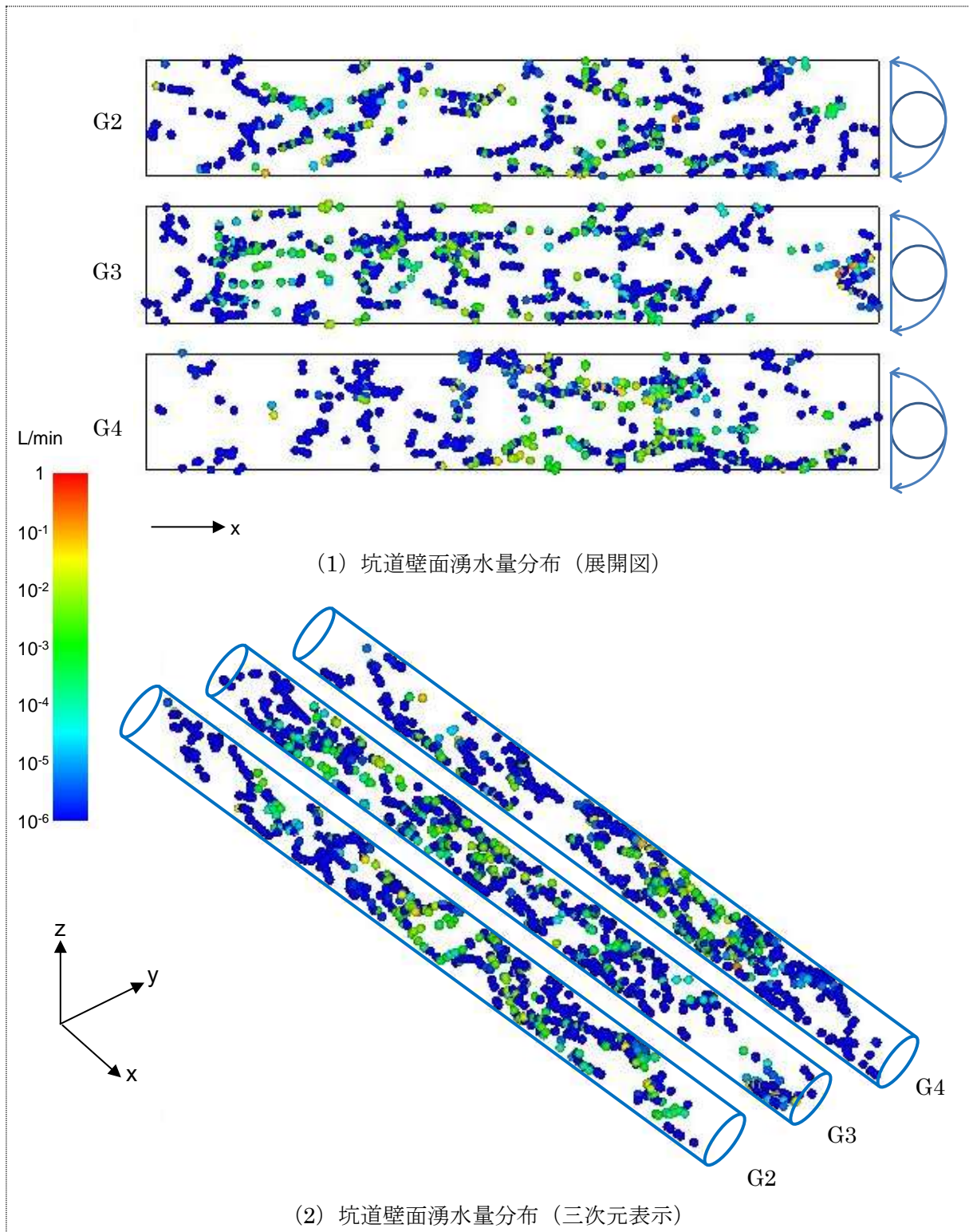
## < 添付資料－A >

複数の処分坑道が処分孔の湧水に与える影響評価

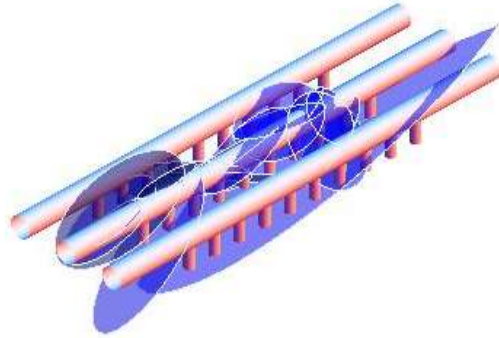
表 A-1 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR01P)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
17502	1.76E-01	17544	6.27E-01	17536	5.13E-01
17510	1.11E-01	17489	5.48E-02	17469	1.75E-01
17501	1.06E-01	17468	5.19E-02	17524	1.75E-01
17544	9.85E-02	17405	4.16E-02	17511	8.99E-02
16766	7.08E-02	17299	2.71E-02	17415	6.27E-02
17382	3.44E-02	17226	2.64E-02	17276	5.46E-02
16617	3.06E-02	16955	2.39E-02	17459	4.93E-02
17047	2.98E-02	17368	2.04E-02	17427	4.60E-02
17404	2.70E-02	17515	1.92E-02	16866	4.33E-02
17515	2.60E-02	17113	1.90E-02	17514	3.16E-02
17472	1.84E-02	17466	1.48E-02	16865	2.63E-02
17383	1.52E-02	17055	6.36E-03	17468	2.53E-02
16618	1.48E-02	16524	5.33E-03	16679	1.83E-02
16969	1.30E-02	17298	5.19E-03	16820	1.23E-02
16968	8.23E-03	17056	5.17E-03	16480	1.21E-02
17369	5.40E-03	17204	5.14E-03	17416	1.01E-02
16737	4.84E-03	17412	5.04E-03	16479	7.75E-03
16585	3.31E-03	16843	4.22E-03	17526	6.80E-03
17071	2.60E-03	10724	3.31E-03	5754	6.10E-03
17244	2.00E-03	17369	3.13E-03	17298	5.62E-03
17332	1.81E-03	15013	2.39E-03	16366	3.00E-03
16813	1.35E-03	10725	2.39E-03	1358	7.55E-04
16829	1.18E-03	16547	2.22E-03	14995	6.64E-04
17139	1.15E-03	16844	1.95E-03	16721	9.15E-05
259	7.07E-04	16849	7.33E-04		
		10758	5.86E-04		
		12994	5.23E-04		
		13902	5.09E-04		
		13521	3.32E-04		
		16713	2.95E-04		
		16714	1.46E-04		
		15105	9.28E-05		

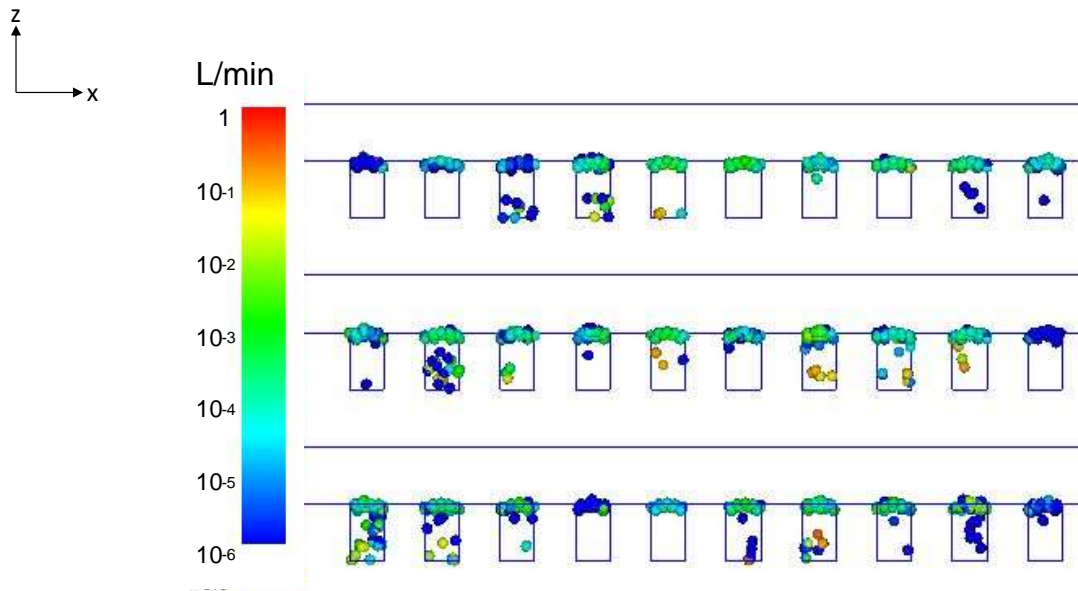




処分孔と交差する割れ目 (0.01L/min 以上)



処分孔との交差割れ目分布



処分孔湧水量分布

図 A-2 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HR01P)

表 A-2 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR02P)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
16443	8.46E-02	16480	4.90E-01	16481	2.17E+00
16446	6.88E-02	16481	2.76E-01	16480	7.46E-01
16454	5.32E-02	16322	2.57E-01	16408	3.47E-01
16480	4.94E-02	16149	1.50E-01	16459	1.58E-01
16270	4.18E-02	16350	1.09E-01	16461	7.34E-02
15751	3.40E-02	16305	7.81E-02	16400	7.28E-02
16458	3.33E-02	15695	7.37E-02	16462	4.21E-02
16036	2.42E-02	16458	4.00E-02	16238	3.62E-02
15944	2.05E-02	14095	3.79E-02	16445	3.35E-02
16322	1.22E-02	15497	3.74E-02	15854	2.75E-02
15609	8.20E-03	15829	3.20E-02	15855	2.30E-02
16341	6.36E-03	15931	3.08E-02	16356	2.17E-02
16085	5.54E-03	15830	2.70E-02	16237	1.74E-02
16011	5.25E-03	16018	2.44E-02	15805	1.62E-02
15610	4.98E-03	16238	2.44E-02	16132	1.61E-02
16439	3.42E-03	16237	2.24E-02	15638	1.31E-02
15718	3.39E-03	16342	2.22E-02	15861	1.29E-02
15813	2.73E-03	16354	1.78E-02	15639	1.24E-02
15580	2.07E-03	16436	1.71E-02	15720	1.06E-02
15945	5.38E-04	16406	8.75E-03	5459	8.73E-03
8989	3.97E-04	16019	8.58E-03	15473	8.07E-03
263	1.41E-04	14751	4.90E-03	5462	3.38E-03
297	1.27E-04	15517	3.42E-03	15375	2.16E-03
		16043	1.71E-03	15472	1.79E-03
		5806	1.41E-03	16043	1.00E-03
		15585	7.56E-04	14069	6.38E-04
		9583	4.72E-04	6628	2.24E-04
		15400	4.26E-04	15523	1.94E-04
		10053	4.07E-04	6627	1.26E-04
		3918	2.42E-04	15673	1.01E-04
		15837	2.37E-04		
		14717	2.28E-04		
		15054	1.38E-04		

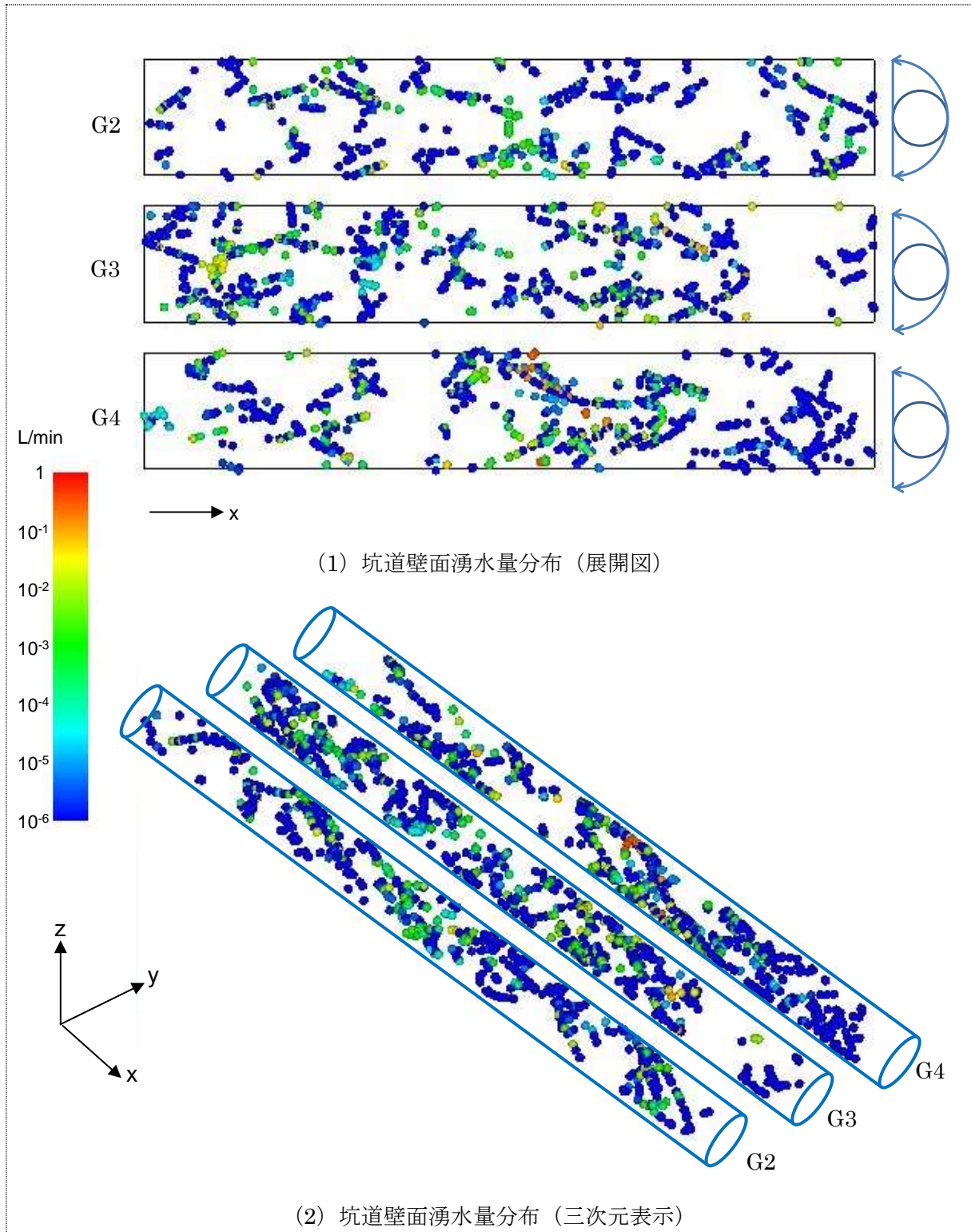
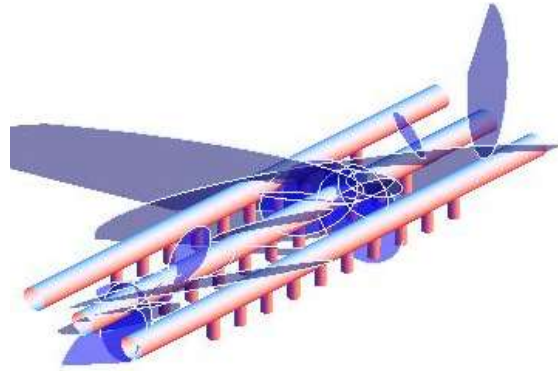


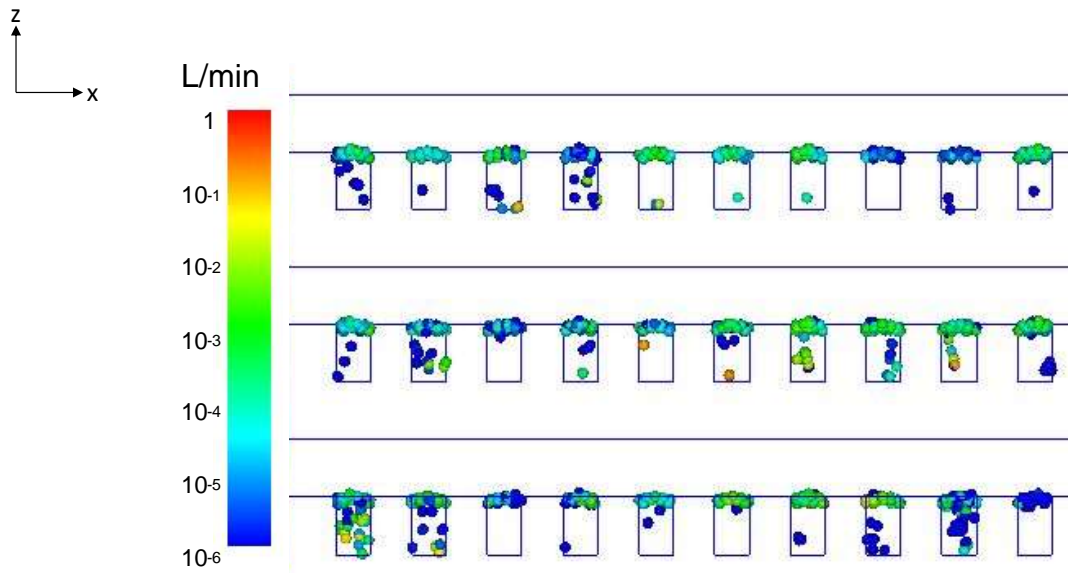
図 A-3 坑道壁面の湧水量分布 (HR02P)



処分孔と交差する割れ目 (0.01L/min 以上)



処分孔との交差割れ目分布



処分孔湧水量分布

図 A-4 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HR02P)



表 A-3 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR03P)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
16897	5.48E-02	16882	6.31E-02	16930	2.42E-01
16905	3.34E-02	16375	5.10E-02	16857	1.53E-01
16869	1.45E-02	16867	1.81E-02	16921	1.23E-01
16895	1.22E-02	16329	1.10E-02	16922	1.09E-01
16193	8.13E-03	16855	8.78E-03	16858	9.38E-02
16873	6.94E-03	16873	8.06E-03	16825	6.43E-02
16778	6.82E-03	16363	7.82E-03	16906	2.46E-02
16855	3.87E-03	16528	5.31E-03	16773	2.37E-02
16560	1.40E-03	16813	2.79E-03	16867	2.15E-02
16009	1.30E-03	10440	2.76E-03	16924	2.09E-02
16119	1.04E-03	16654	2.54E-03	16811	1.36E-02
15218	7.13E-04	16047	2.07E-03	16127	1.18E-02
16665	6.33E-04	16362	1.70E-03	16741	8.58E-03
16572	5.70E-04	16367	8.65E-04	16123	8.56E-03
16115	2.98E-04	16276	4.38E-04	15916	6.60E-03
16120	2.57E-04	15963	4.38E-04	16500	4.68E-03
16919	2.00E-04	14617	3.20E-04	16474	4.47E-03
16691	1.58E-04	16631	2.99E-04	16081	3.35E-03
16692	1.43E-04	15962	1.64E-04	16264	1.96E-03
15943	8.03E-05	4580	1.15E-04	14460	1.87E-03
16786	8.01E-05	8049	8.06E-05	14509	9.28E-04
		15142	7.60E-05	16702	4.53E-04
		4575	6.64E-05		

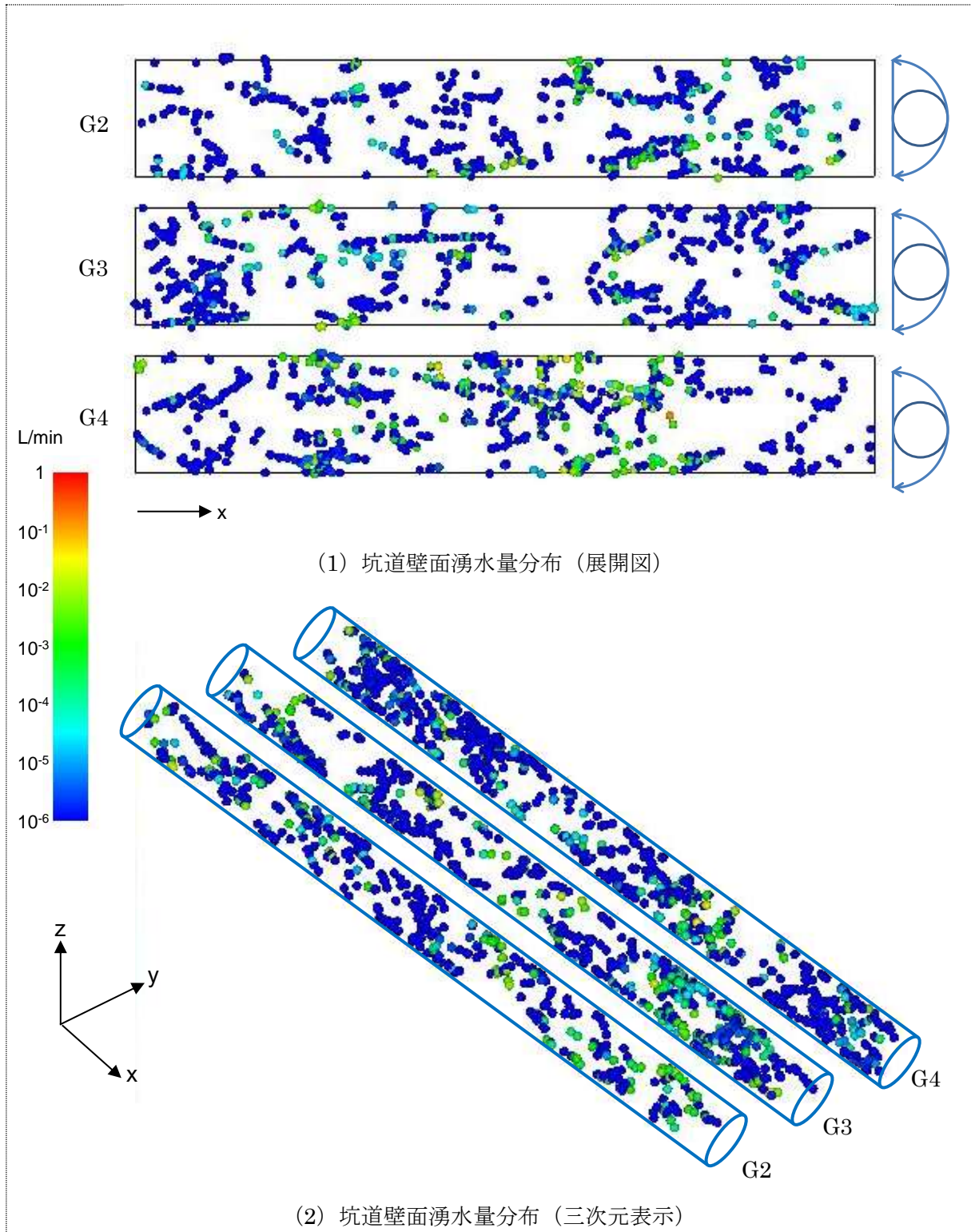
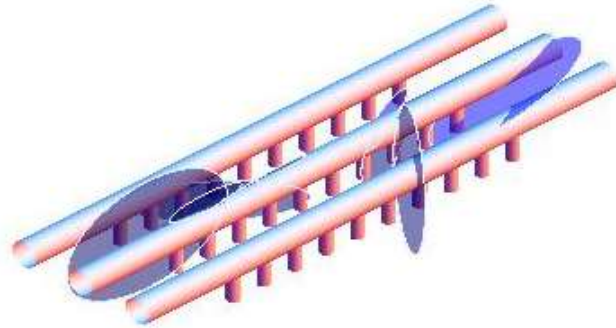
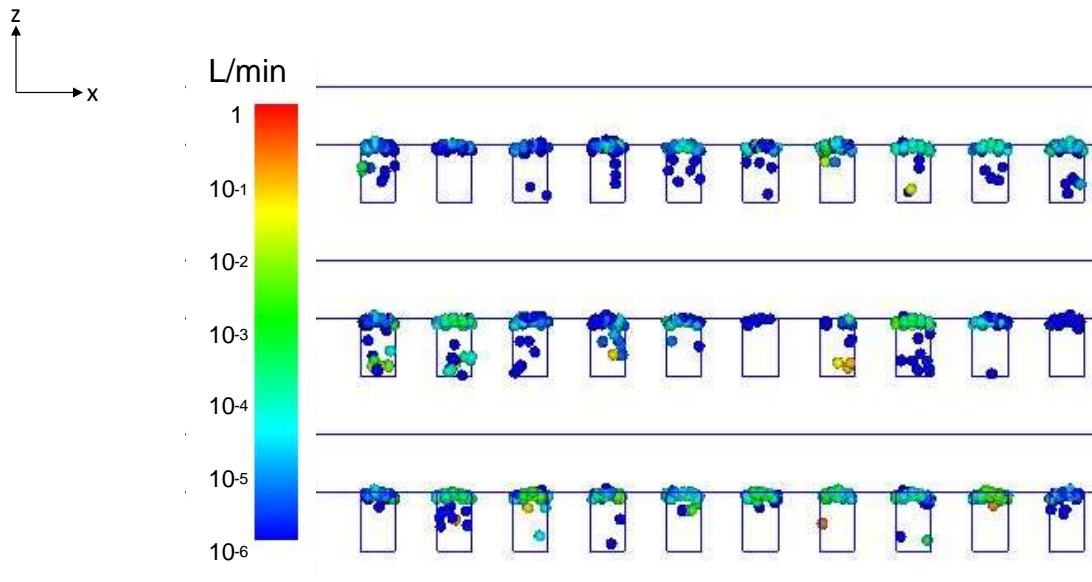


図 A-5 坑道壁面の湧水量分布 (HR03P)

処分孔と交差する割れ目 (0.01L/min 以上)



処分孔との交差割れ目分布



処分孔湧水量分布

図 A-6 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HR03P)

表 A-4 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR04P)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
16739	9.06E-02	16760	8.23E-02	16738	5.20E-02
16760	4.14E-02	16751	8.21E-02	16691	2.67E-02
16411	3.94E-02	16710	5.83E-02	16605	1.90E-02
16694	2.86E-02	16738	4.00E-02	16699	1.77E-02
16693	2.85E-02	16473	3.74E-02	16536	1.62E-02
16747	2.74E-02	16709	2.37E-02	16347	1.49E-02
16710	1.98E-02	16660	1.21E-02	16346	1.34E-02
16614	1.64E-02	16322	1.02E-02	16698	9.43E-03
16659	1.16E-02	16406	7.15E-03	16643	6.40E-03
16615	1.14E-02	16410	4.17E-03	16508	6.30E-03
16624	1.09E-02	16491	4.10E-03	16604	4.91E-03
16622	9.43E-03	16409	3.40E-03	16572	4.58E-03
16468	8.54E-03	16159	3.25E-03	6096	2.78E-03
15826	7.77E-03	16221	3.05E-03	16259	2.04E-03
16057	6.14E-03	15841	2.11E-03	16479	1.84E-03
16547	4.07E-03	15914	1.64E-03	16751	1.19E-03
16709	3.59E-03	16160	1.34E-03	16149	1.18E-03
16480	2.83E-03	16068	1.22E-03	16574	9.99E-04
15983	2.34E-03	15877	6.74E-04	15783	9.76E-04
16660	4.97E-04	16127	5.86E-04	15803	8.59E-04
15796	2.48E-04	14841	5.47E-04	16148	8.29E-04
2087	2.38E-04	15842	4.87E-04	15736	6.22E-04
636	6.88E-05	16622	2.13E-04	15988	5.81E-04
3953	6.51E-05	16189	1.13E-04	16323	3.95E-04
		14996	9.51E-05	16053	3.62E-04
		16188	9.06E-05	15755	2.06E-04
		2560	8.88E-05		
		16234	7.41E-05		



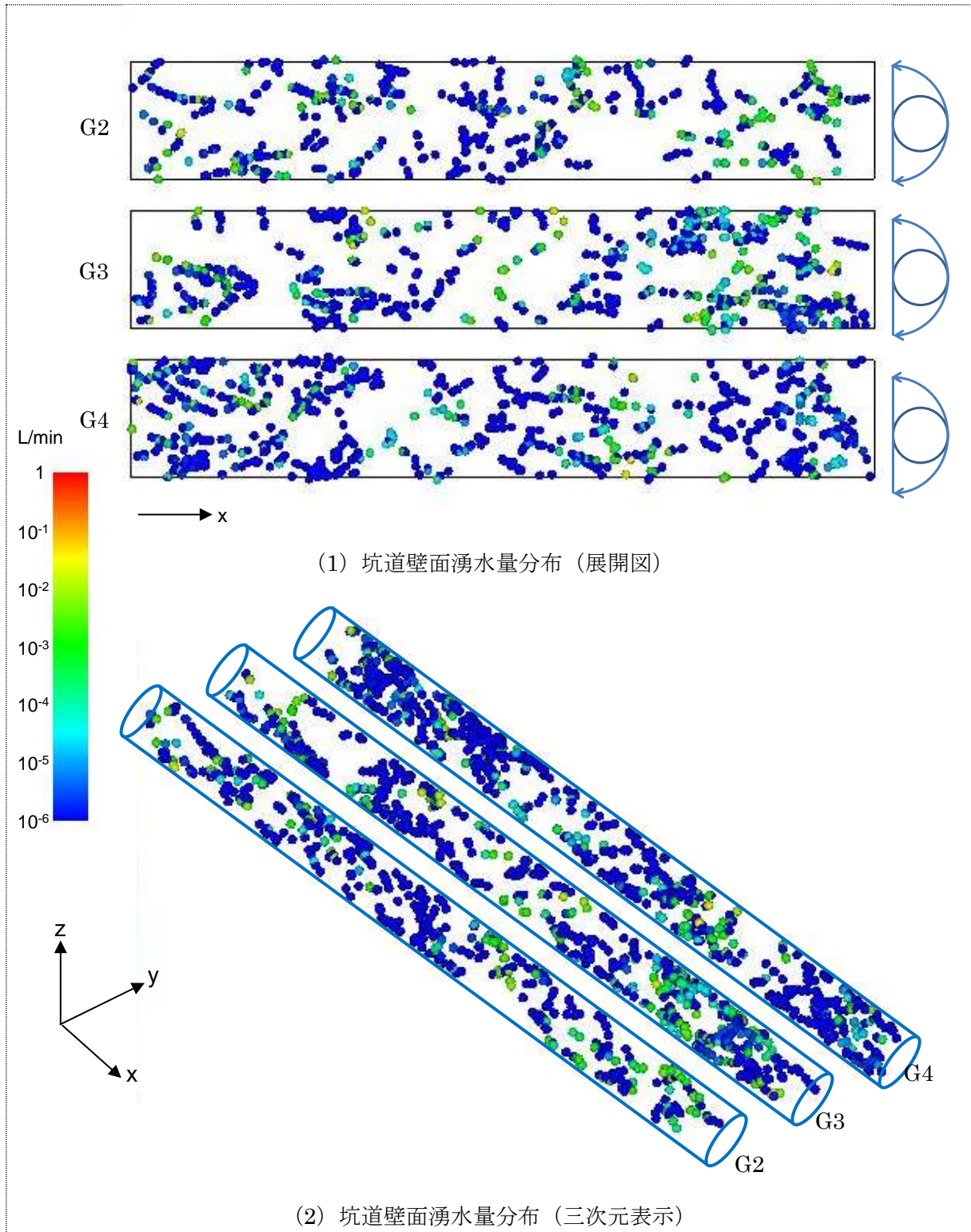
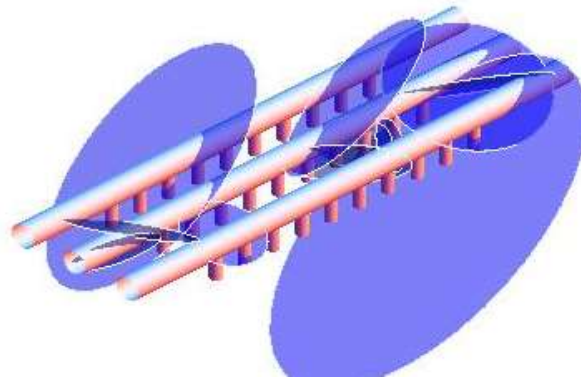
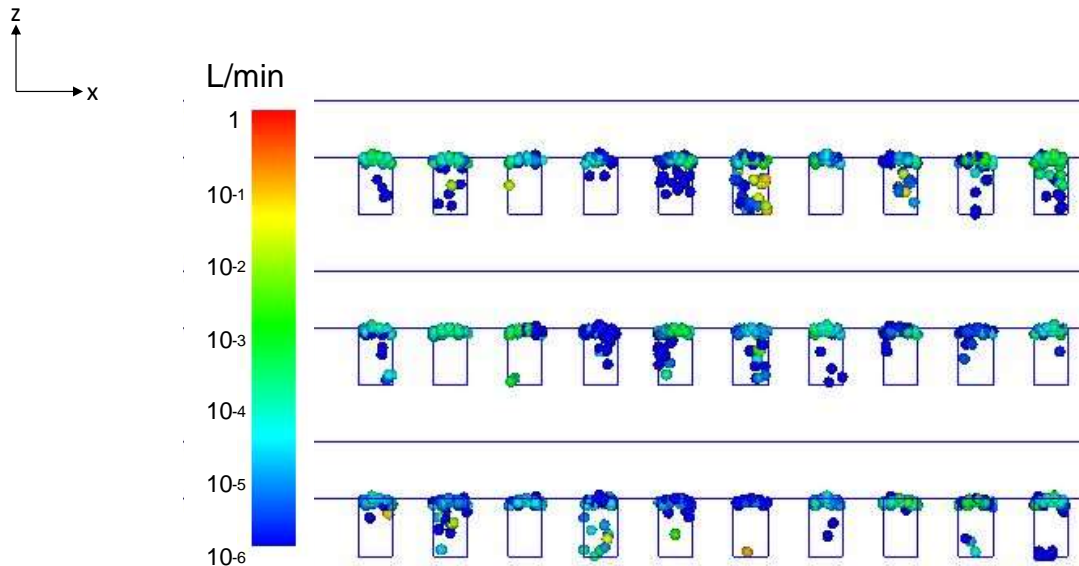


図 A-7 坑道壁面の湧水量分布 (HR04P)

処分孔と交差する割れ目 (0.01L/min 以上)



処分孔との交差割れ目分布



処分孔湧水量分布

図 A-8 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HR04P)

表 A-5 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR05P)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
17077	2.09E+00	17078	1.91E-01	17039	2.79E-02
17078	1.03E+00	17046	1.55E-02	16899	1.95E-02
16460	1.13E-01	17052	9.56E-03	16370	2.14E-04
16461	7.97E-02	16399	8.10E-03	16232	2.08E-04
17022	5.43E-02	17039	4.52E-03	16947	1.50E-04
17072	1.75E-02	16727	3.06E-03	15885	8.71E-05
16617	1.37E-02	16155	2.55E-03		
17059	7.08E-03	16296	1.55E-03		
17052	3.21E-03	16771	1.09E-03		
16986	3.05E-03	17059	1.01E-03		
16746	1.36E-03	16233	5.07E-04		
16540	5.01E-04	16482	3.97E-04		
16322	4.81E-04	16418	1.23E-04		
16893	2.54E-04	3091	6.62E-05		
15529	1.77E-04				
15787	8.90E-05				
14357	8.09E-05				
14356	7.56E-05				



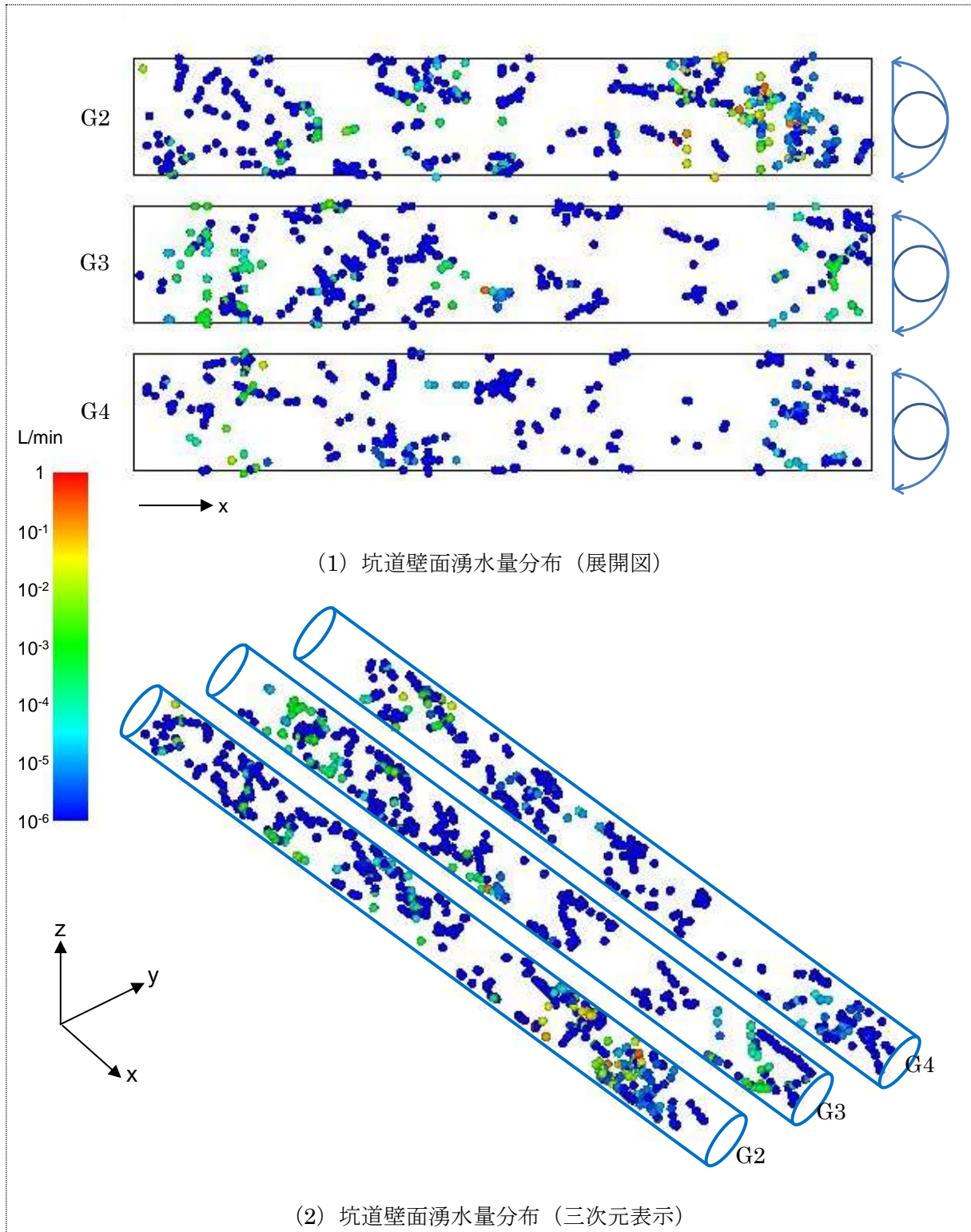
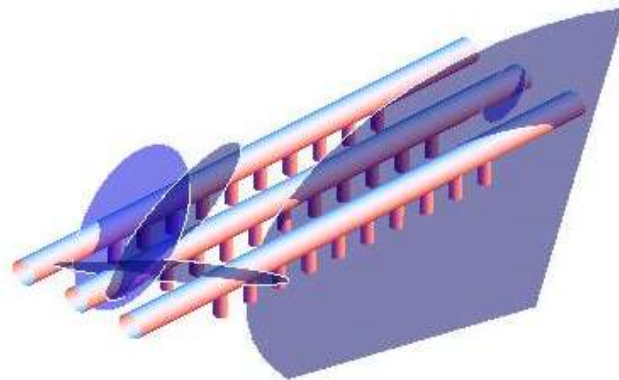
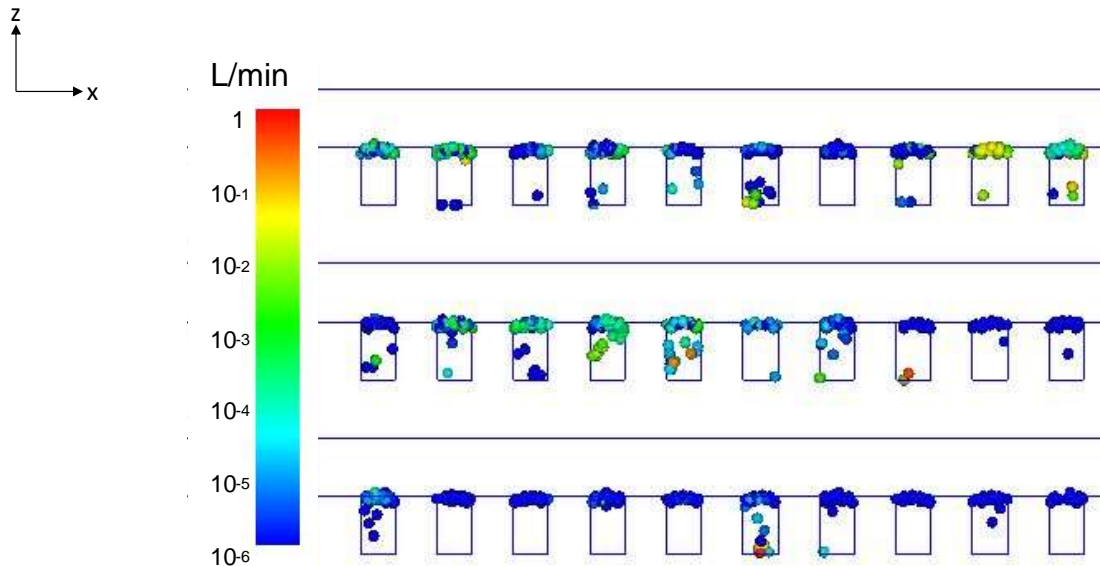


図 A-9 坑道壁面の湧水量分布 (HR05P)

処分孔と交差する割れ目 (0.01L/min 以上)



処分孔との交差割れ目分布



処分孔湧水量分布

図 A-10 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HR05P)

表 A-6 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR06P)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
17531	4.71E-01	17531	1.39E+00	17531	4.71E-01
17534	3.60E-01	17153	1.87E-01	17534	3.60E-01
17503	2.98E-01	17517	1.01E-01	17503	2.98E-01
17517	6.42E-02	17330	5.03E-02	17517	6.42E-02
17511	6.36E-02	17466	2.88E-02	17511	6.36E-02
17480	4.36E-02	17514	2.66E-02	17480	4.36E-02
17409	2.20E-02	16605	2.44E-02	17409	2.20E-02
17215	2.11E-02	17215	1.59E-02	17215	2.11E-02
17128	1.81E-02	16728	1.35E-02	17128	1.81E-02
17265	1.25E-02	17024	1.00E-02	17265	1.25E-02
16799	1.03E-02	17219	8.32E-03	16799	1.03E-02
17340	8.93E-03	16912	7.81E-03	17340	8.93E-03
17420	8.84E-03	17480	7.36E-03	17420	8.84E-03
17236	4.58E-03	17230	6.77E-03	17236	4.58E-03
17394	3.91E-03	16984	5.60E-03	17394	3.91E-03
16700	2.66E-03	17382	2.88E-03	16700	2.66E-03
17251	1.54E-03	16638	2.52E-03	17251	1.54E-03
17245	6.64E-04	16544	1.00E-03	17245	6.64E-04
17021	5.24E-04	16872	9.22E-04	17021	5.24E-04
17244	1.67E-04	15993	4.78E-04	17244	1.67E-04
16077	1.39E-04	17394	3.04E-04	16077	1.39E-04
16076	8.40E-05	12335	2.68E-04	16076	8.40E-05
		15386	8.87E-05		
		17208	7.82E-05		
		13661	6.96E-05		
		16580	6.23E-05		

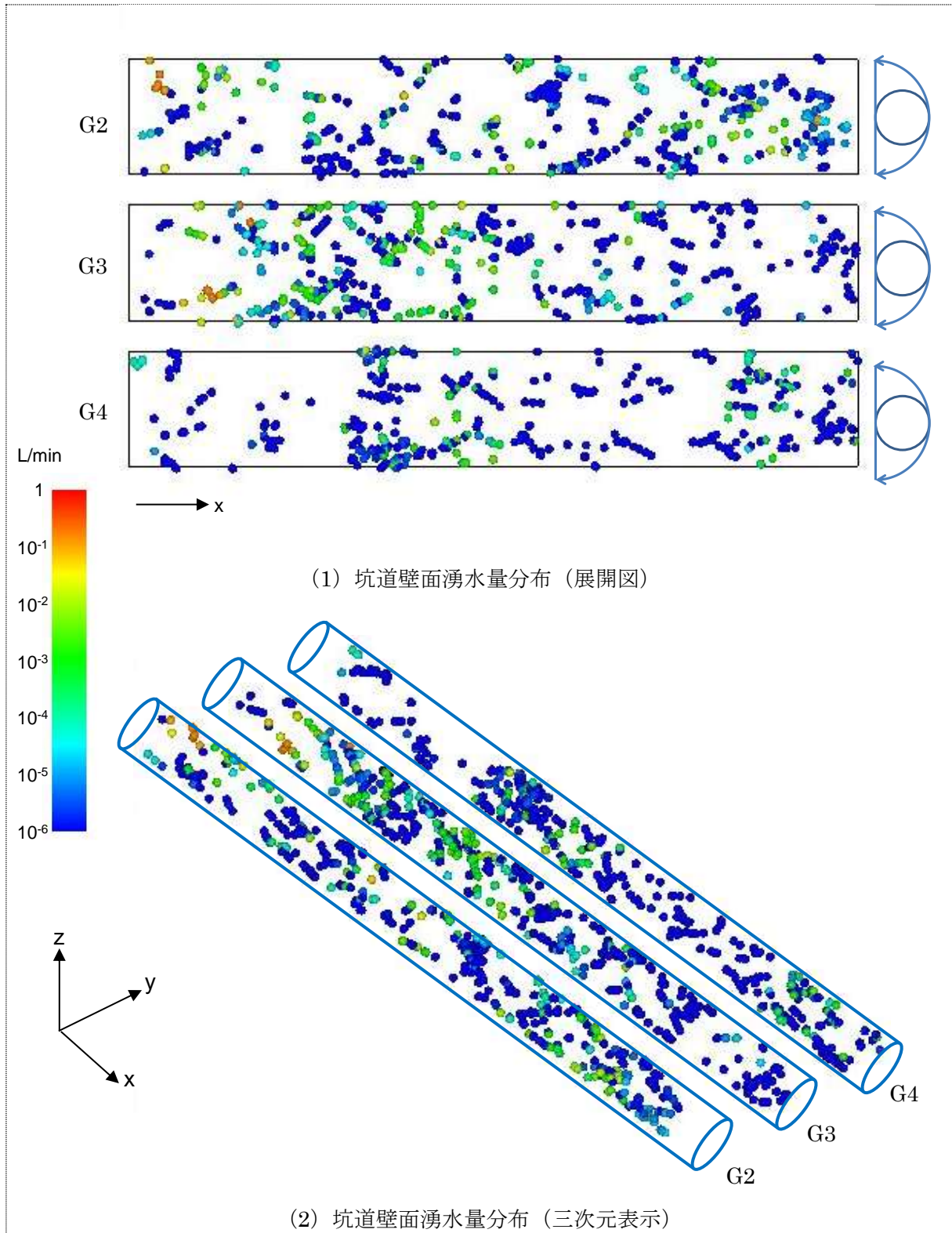
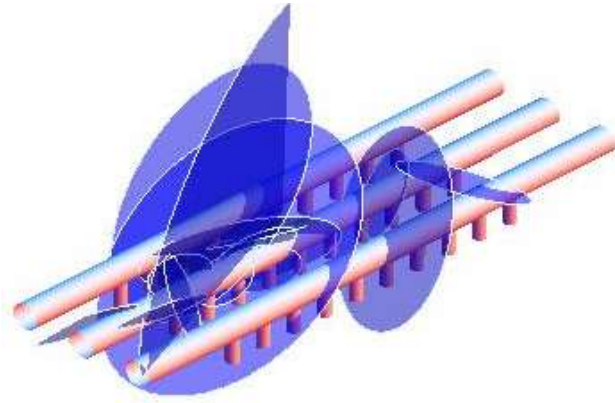
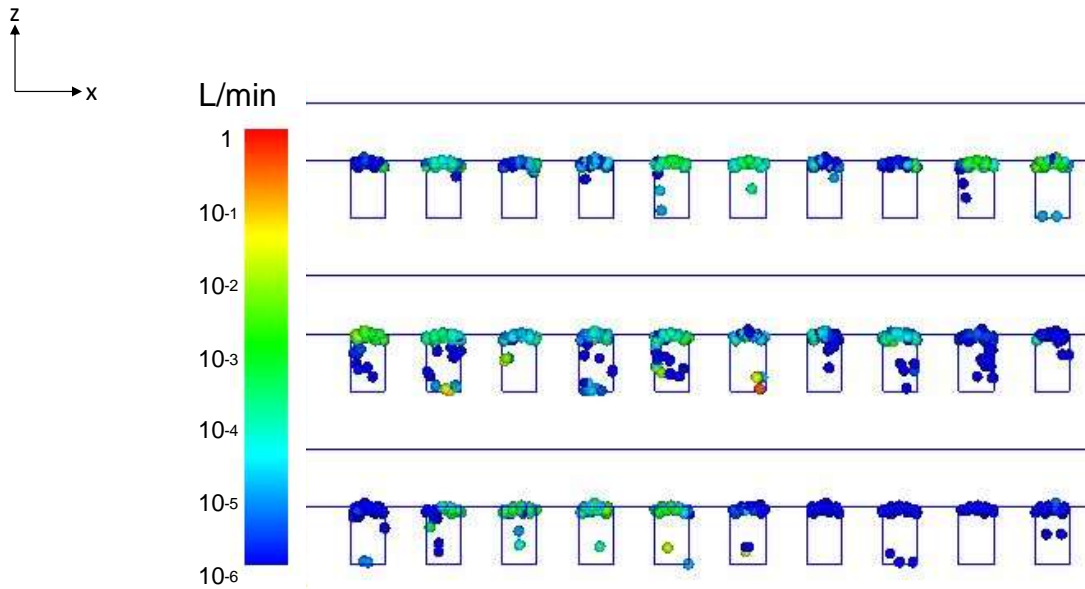


図 A-11 坑道壁面の湧水量分布 (HR06P)

処分孔と交差する割れ目 (0.01L/min 以上)



処分孔との交差割れ目分布



処分孔湧水量分布

図 A-12 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HR06P)



表 A-7 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR07P)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
17802	6.93E-01	17802	1.78E+00	17802	9.90E-01
17760	4.84E-02	17697	2.12E-01	17624	1.35E-01
17089	2.07E-02	17743	1.08E-01	17743	3.36E-02
17765	1.69E-02	17750	8.44E-02	17697	2.57E-02
17540	1.27E-02	17605	7.32E-02	13409	2.22E-02
17773	9.77E-03	17769	7.15E-02	17655	1.84E-02
17306	9.62E-03	17686	5.96E-02	7662	1.67E-02
17706	7.42E-03	17773	5.87E-02	17686	1.39E-02
17629	6.14E-03	17096	4.23E-02	17244	1.07E-02
17501	6.13E-03	17540	3.15E-02	17730	8.26E-03
16883	5.29E-03	17333	2.81E-02	17273	5.94E-03
17113	4.19E-03	16891	1.75E-02	17752	3.33E-03
3201	3.84E-03	17562	1.50E-02	17282	3.08E-03
17409	2.72E-03	17110	1.44E-02	17091	2.54E-03
17059	8.25E-04	17481	1.43E-02	16848	1.01E-03
16119	5.92E-04	15456	8.72E-03	17139	1.00E-03
17605	5.42E-04	17706	8.39E-03	13799	8.81E-04
16973	5.04E-04	17032	6.71E-03	14578	8.34E-04
16804	3.12E-04	17136	4.97E-03	17745	4.61E-04
		17466	4.87E-03	16783	4.32E-04
		17323	4.80E-03	17302	2.88E-04
		1113	2.72E-03	12059	1.84E-04
		17629	1.45E-03	14172	1.19E-04
		12919	1.39E-03	16963	1.07E-04
		16825	9.40E-04	15678	8.29E-05
		16123	1.04E-04	17179	6.69E-05
		12138	9.07E-05		
		15745	8.09E-05		
		16783	7.36E-05		

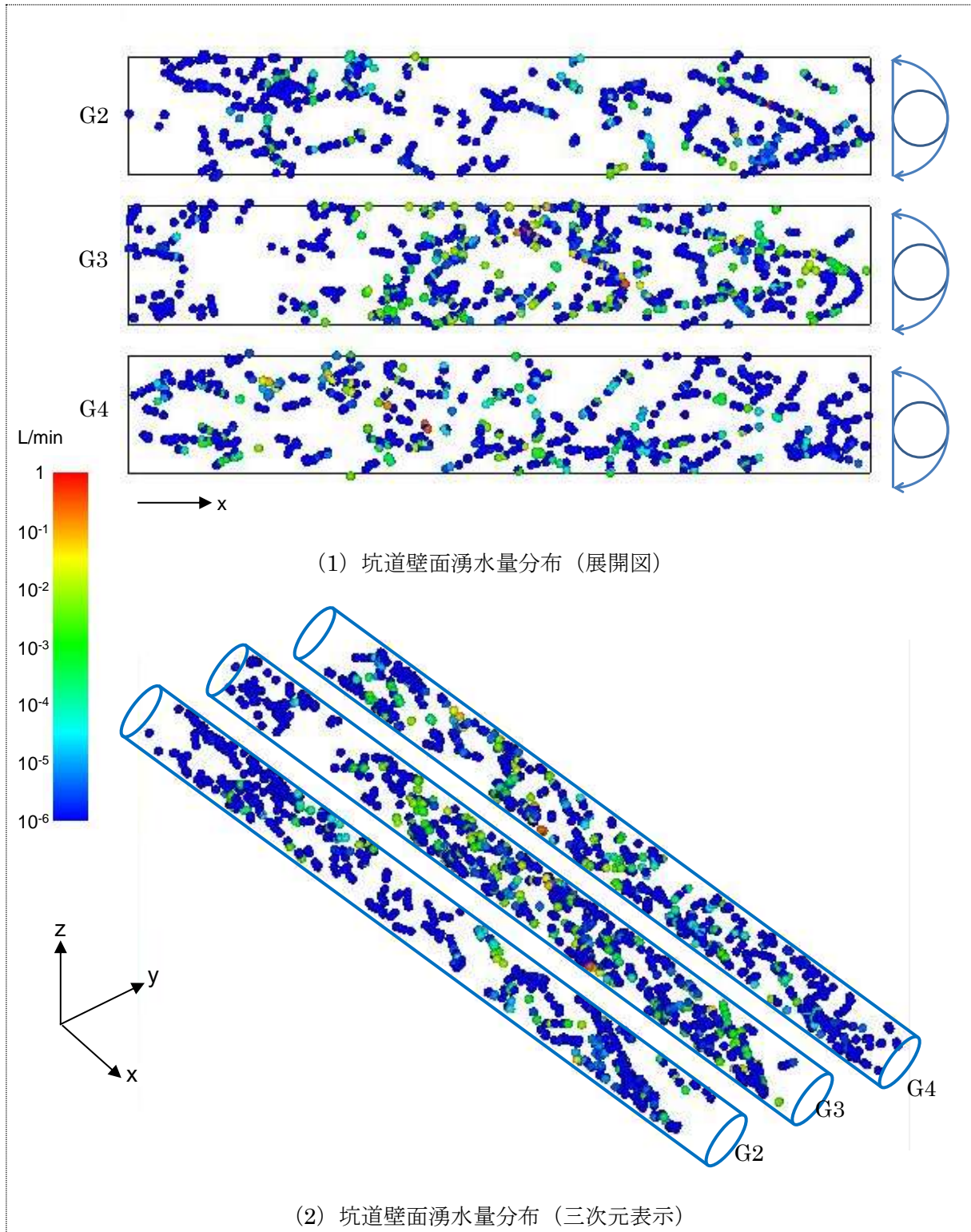
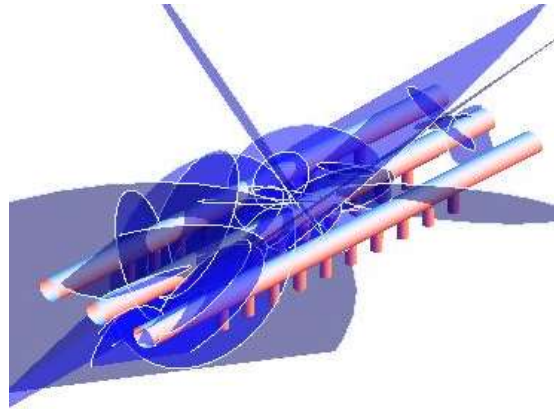


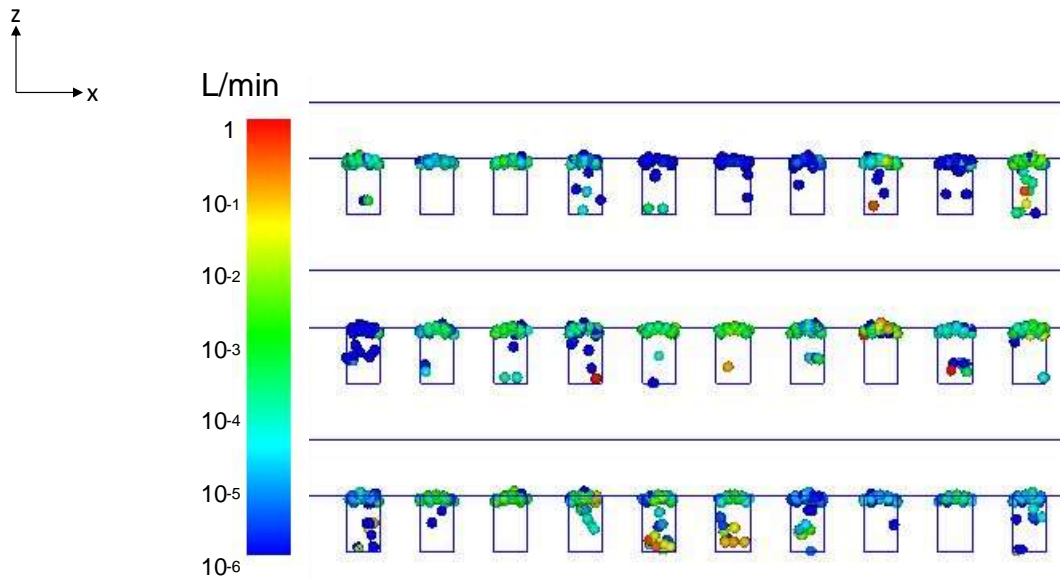
図 A-13 坑道壁面の湧水量分布 (HR07P)



処分孔と交差する割れ目 (0.01L/min 以上)



処分孔との交差割れ目分布



処分孔湧水量分布

図 A-14 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HR07P)

表 A-8 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR08P)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
17145	8.10E-01	17145	5.12E+00	17147	4.61E+00
17147	2.68E-01	17147	3.40E+00	17143	1.61E+00
17112	2.47E-01	17143	1.38E+00	17141	5.36E-01
17118	1.98E-01	17128	1.25E+00	17098	4.08E-01
16938	1.19E-01	17113	3.52E-01	17128	4.03E-01
17037	9.54E-02	17141	3.30E-01	17074	2.40E-01
17124	8.77E-02	16556	2.85E-01	17047	1.73E-01
16788	7.17E-02	17047	2.50E-01	17126	1.59E-01
17101	6.67E-02	17118	1.93E-01	17084	1.34E-01
17015	5.40E-02	17088	1.77E-01	17061	1.25E-01
16746	4.00E-02	17017	1.65E-01	16206	1.09E-01
16969	3.00E-02	16657	1.23E-01	16946	7.29E-02
16959	2.49E-02	17002	1.14E-01	17017	6.33E-02
16877	2.19E-02	17124	1.08E-01	17038	5.82E-02
17028	1.72E-02	16971	8.53E-02	16429	5.01E-02
16618	1.31E-02	17037	8.14E-02	16811	4.30E-02
13865	1.30E-02	17074	5.55E-02	17035	4.06E-02
16814	9.06E-03	16906	5.01E-02	16556	3.70E-02
16789	8.20E-03	17061	4.50E-02	16949	3.32E-02
16379	7.88E-03	16901	3.67E-02	16922	2.49E-02
17032	6.88E-03	16660	2.96E-02	17088	2.12E-02
16856	6.11E-03	16625	2.64E-02	16996	1.54E-02
16427	4.74E-03	16500	1.92E-02	17002	1.45E-02
17114	3.93E-03	16448	1.78E-02	17113	3.12E-03
16552	3.21E-03	16258	1.78E-02	16767	2.69E-03
16344	2.17E-03	15756	9.20E-03	7334	2.22E-03
16310	1.66E-03	16160	5.96E-03	16546	7.32E-04
16855	1.52E-03	15169	5.06E-03	3352	1.29E-04
9299	8.24E-04	16789	1.75E-03	2829	1.07E-04
10602	2.93E-04	15225	5.43E-04	2589	1.03E-04
11285	7.55E-05	8612	3.12E-04	5035	9.59E-05
16088	7.27E-05	11769	1.46E-04	13994	9.24E-05
13546	6.57E-05	15602	1.01E-04	14334	7.43E-05
14063	6.44E-05	8878	9.85E-05		
		15715	9.01E-05		
		8303	7.34E-05		
		14058	7.28E-05		

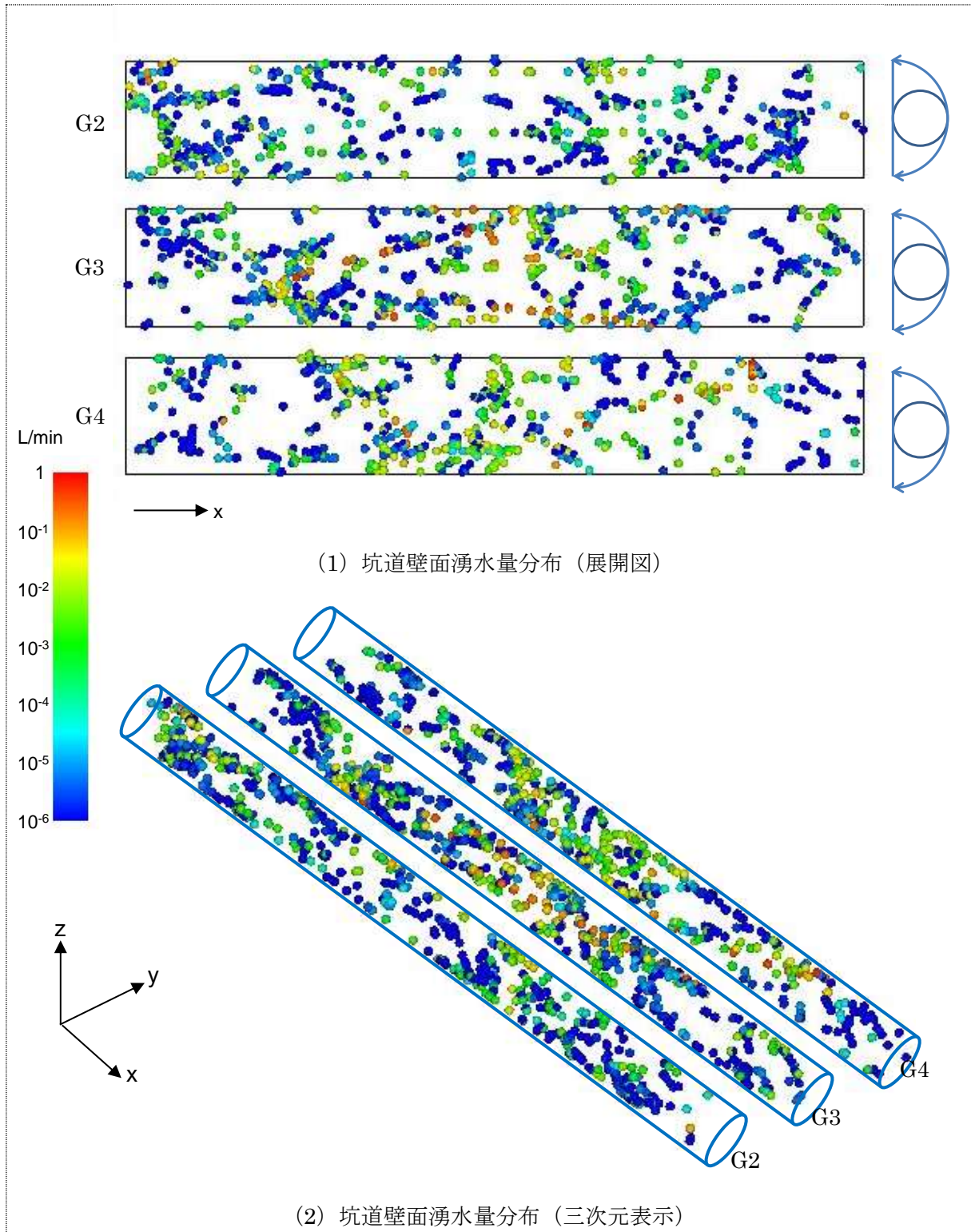


図 A-15 坑道壁面の湧水量分布 (HR08P)

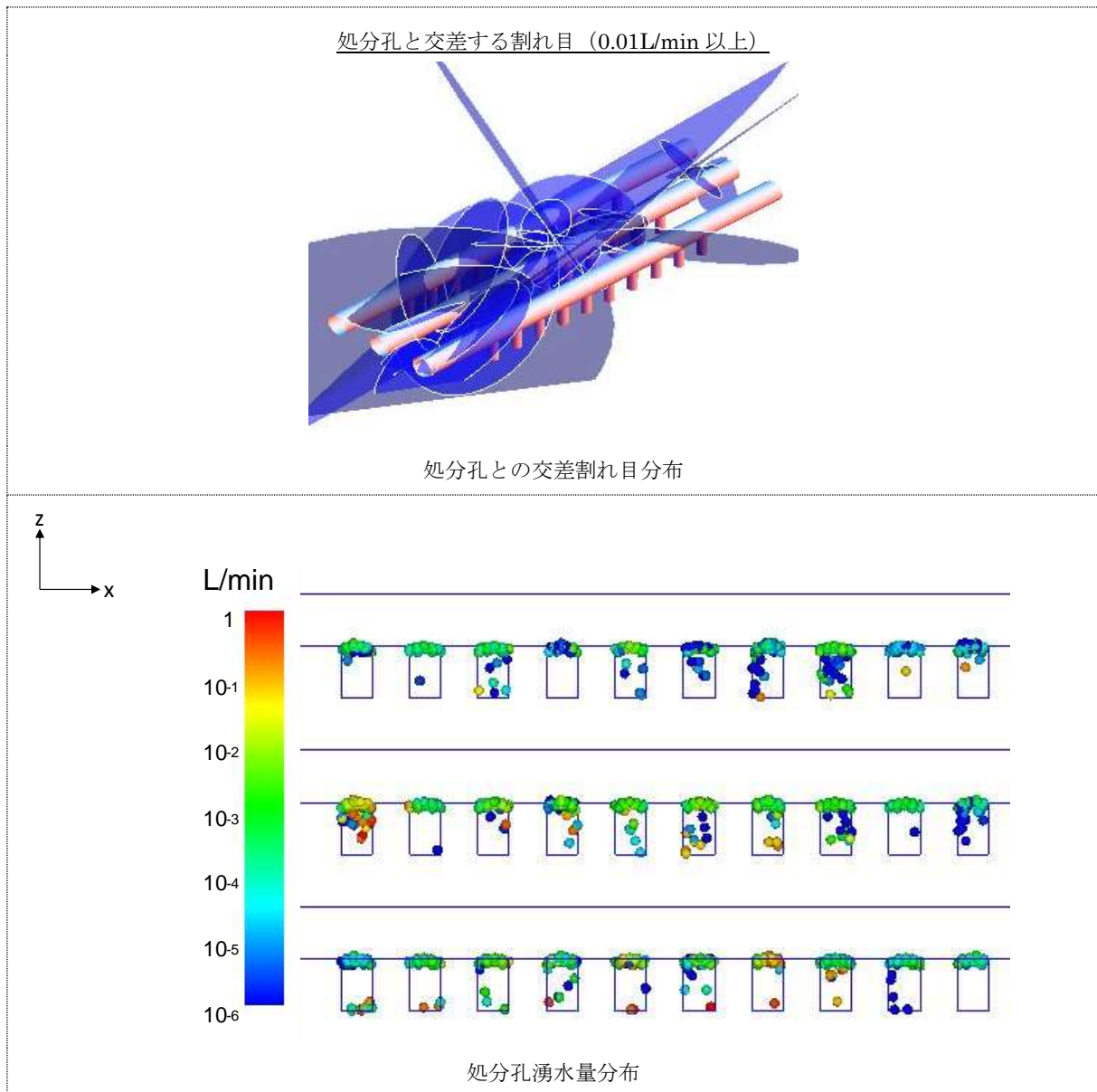


図 A-16 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HR08P)

表 A-9 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR09P)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
16866	1.55E+01	16195	8.28E-02	16823	1.38E-01
16700	1.46E+00	16557	7.13E-02	16819	1.05E-01
16865	5.55E-01	16196	6.00E-02	16427	5.50E-02
16764	4.09E-02	16511	2.85E-02	16664	8.30E-03
16816	3.92E-02	16532	8.92E-03	16809	6.73E-03
16798	3.29E-02	16809	6.09E-03	16153	5.25E-03
16792	1.47E-02	16055	5.00E-03	16188	2.41E-03
16804	1.40E-02	16792	2.27E-03	15911	1.94E-03
16557	1.20E-02	16594	1.95E-03	16681	1.89E-03
16808	7.20E-03	16226	1.88E-03	16686	1.38E-03
8932	5.52E-03	15984	1.23E-03	16228	1.27E-03
7274	5.04E-03	16228	1.19E-03	16227	8.51E-04
15304	2.51E-03	16090	1.18E-03	16023	4.69E-04
16539	1.79E-03	16583	1.17E-03	12513	1.43E-04
16028	1.10E-03	16227	9.30E-04	16010	1.13E-04
16532	5.32E-04	16153	4.78E-04	11009	6.84E-05
9265	2.56E-04	1312	3.79E-04		
16809	1.85E-04	16542	2.74E-04		
15626	1.48E-04	15099	1.27E-04		
3588	1.44E-04	16496	1.18E-04		
902	9.08E-05				



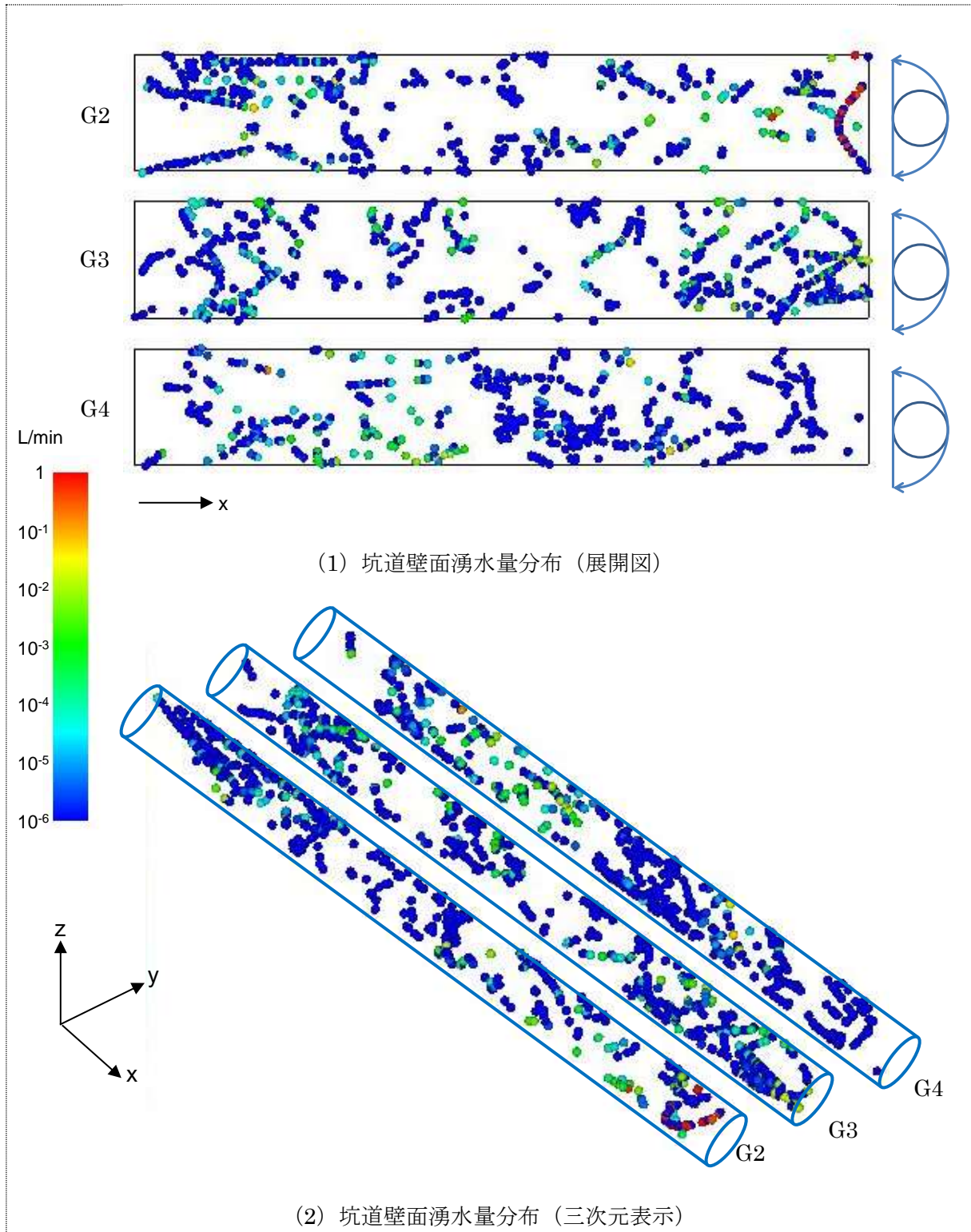
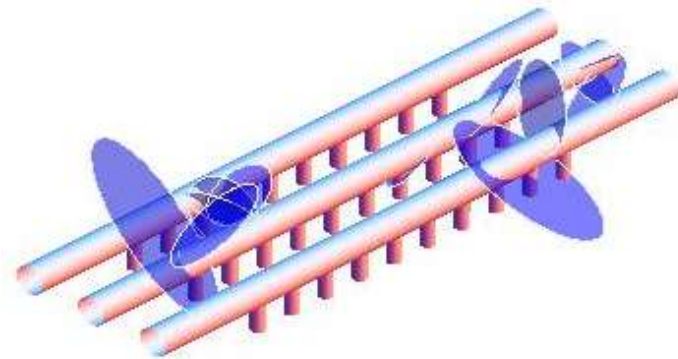
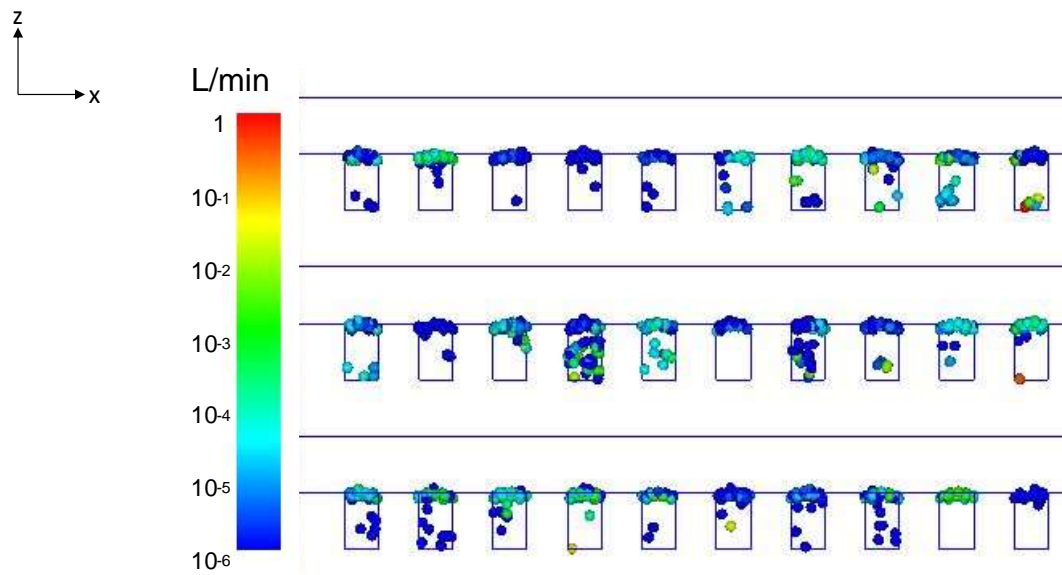


図 A-17 坑道壁面の湧水量分布 (HR09P)

処分孔と交差する割れ目 (0.01L/min 以上)



処分孔との交差割れ目分布



処分孔湧水量分布

図 A-18 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HR09P)



表 A-10 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR10P)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
18281	3.65E-01	18317	8.10E-01	18305	1.64E-01
18307	1.01E-01	18307	3.87E-01	18307	1.53E-01
18036	9.20E-02	18308	1.96E-01	18303	7.24E-02
18280	5.36E-02	17485	1.59E-01	18232	4.08E-02
18226	5.02E-02	18228	1.49E-01	18065	2.24E-02
18059	4.06E-02	18203	1.33E-01	17992	1.63E-02
18278	2.53E-02	18226	1.17E-01	18144	1.62E-02
17973	1.00E-02	18063	6.66E-02	17566	1.16E-02
18188	9.29E-03	17484	4.43E-02	18226	8.84E-03
17979	7.07E-03	18016	2.48E-02	17565	8.28E-03
17818	6.36E-03	18280	2.29E-02	18094	8.13E-03
17595	4.23E-03	17991	1.93E-02	17739	4.46E-03
17264	4.10E-03	17905	1.86E-02	17630	1.23E-03
17201	3.96E-03	18029	1.73E-02	17530	8.25E-04
17150	3.15E-03	17977	1.44E-02	18051	2.56E-04
16203	2.36E-03	18030	1.40E-02		
17817	1.72E-03	17696	9.08E-03		
18228	1.07E-03	18222	7.77E-03		
17854	9.70E-04	17398	7.19E-03		
10653	7.79E-04	14810	5.24E-03		
17299	6.48E-04	18121	1.55E-03		
10074	4.60E-04	17854	1.04E-03		
12329	3.95E-04	11280	1.01E-03		
18093	3.94E-04	17397	5.63E-04		
18060	3.80E-04	18093	5.31E-04		
24	3.65E-04	17100	1.04E-04		
6973	2.21E-04	12379	7.73E-05		
17234	1.13E-04				

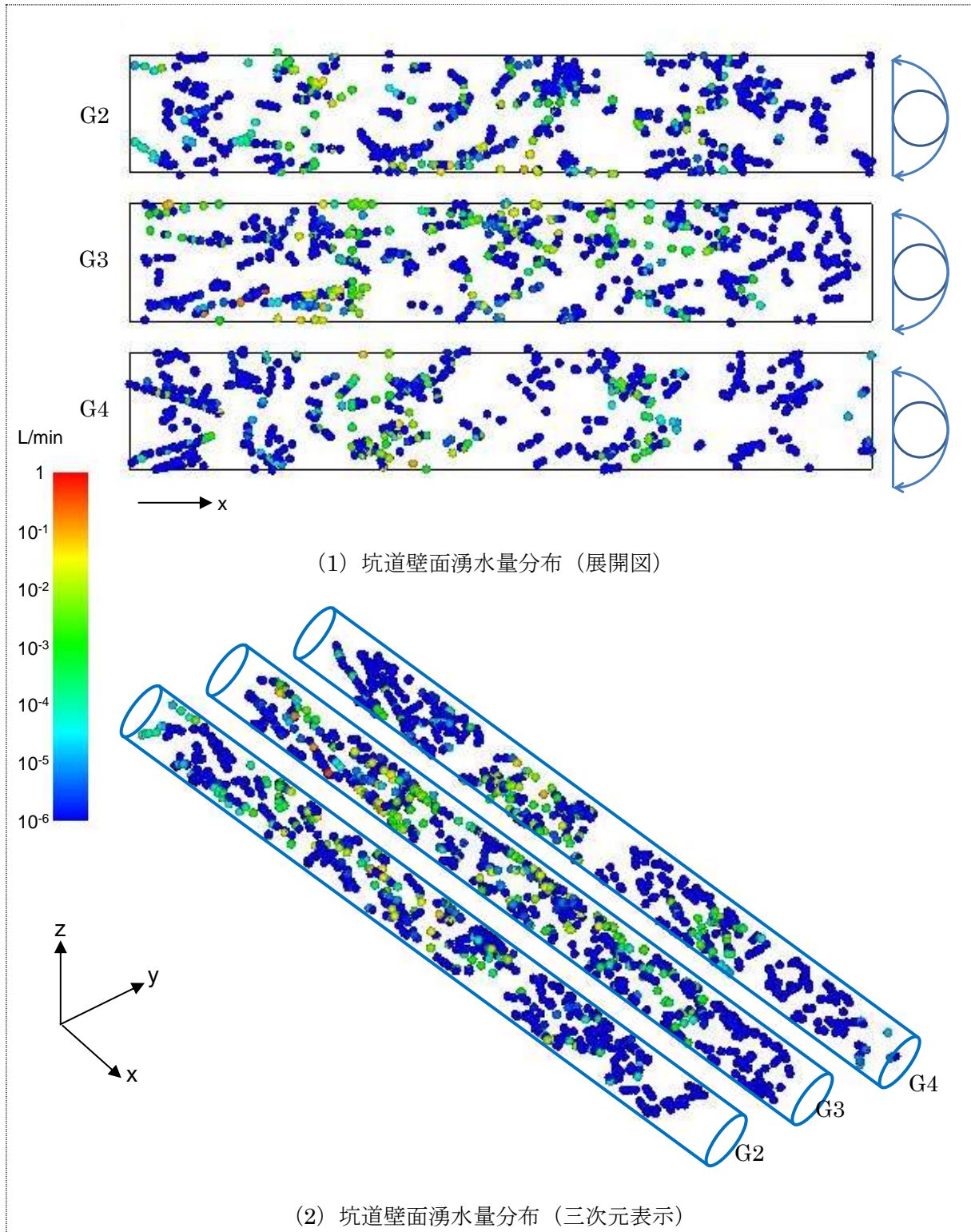
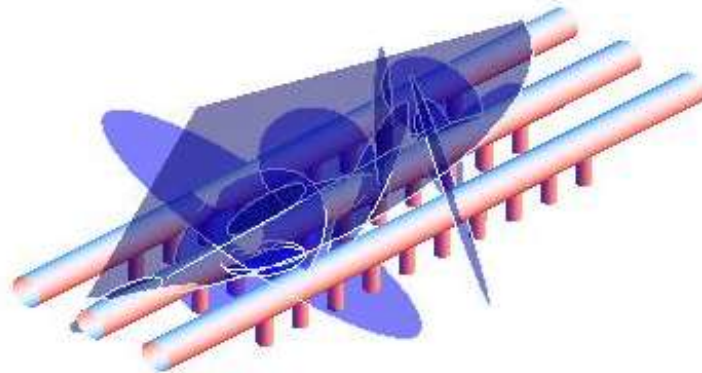
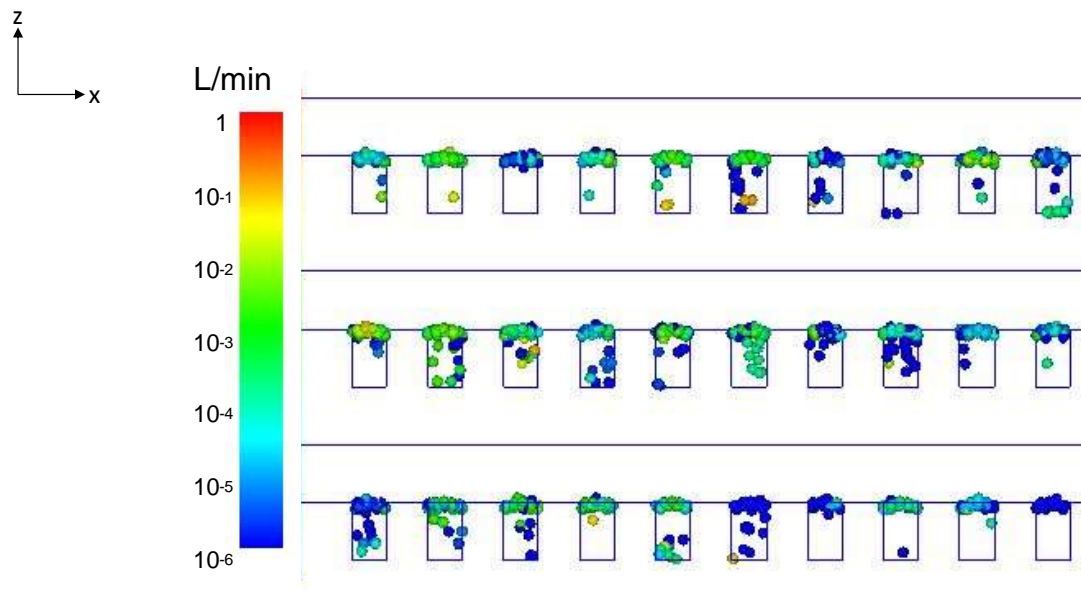


図 A-19 坑道壁面の湧水量分布 (HR10P)

処分孔と交差する割れ目 (0.01L/min 以上)



処分孔との交差割れ目分布



処分孔湧水量分布

図 A-20 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HR10P)

## <添付資料－B>

グラウトの施工手順を考慮した処分孔湧水の評価

表 B-1 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR08P, STEP0)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
17145	8.10E-01	17145	5.12E+00	17147	4.61E+00
17147	2.68E-01	17147	3.40E+00	17143	1.61E+00
17112	2.47E-01	17143	1.38E+00	17141	5.36E-01
17118	1.98E-01	17128	1.25E+00	17098	4.08E-01
16938	1.19E-01	17113	3.52E-01	17128	4.03E-01
17037	9.54E-02	17141	3.30E-01	17074	2.40E-01
17124	8.77E-02	16556	2.85E-01	17047	1.73E-01
16788	7.17E-02	17047	2.50E-01	17126	1.59E-01
17101	6.67E-02	17118	1.93E-01	17084	1.34E-01
17015	5.40E-02	17088	1.77E-01	17061	1.25E-01
16746	4.00E-02	17017	1.65E-01	16206	1.09E-01
16969	3.00E-02	16657	1.23E-01	16946	7.29E-02
16959	2.49E-02	17002	1.14E-01	17017	6.33E-02
16877	2.19E-02	17124	1.08E-01	17038	5.82E-02
17028	1.72E-02	16971	8.53E-02	16429	5.01E-02
16618	1.31E-02	17037	8.14E-02	16811	4.30E-02
13865	1.30E-02	17074	5.55E-02	17035	4.06E-02
16814	9.06E-03	16906	5.01E-02	16556	3.70E-02
16789	8.20E-03	17061	4.50E-02	16949	3.32E-02
16379	7.88E-03	16901	3.67E-02	16922	2.49E-02
17032	6.88E-03	16660	2.96E-02	17088	2.12E-02
16856	6.11E-03	16625	2.64E-02	16996	1.54E-02
16427	4.74E-03	16500	1.92E-02	17002	1.45E-02
17114	3.93E-03	16448	1.78E-02	17113	3.12E-03
16552	3.21E-03	16258	1.78E-02	16767	2.69E-03
16344	2.17E-03	15756	9.20E-03	7334	2.22E-03
16310	1.66E-03	16160	5.96E-03	16546	7.32E-04
16855	1.52E-03	15169	5.06E-03	3352	1.29E-04
9299	8.24E-04	16789	1.75E-03	2829	1.07E-04
10602	2.93E-04	15225	5.43E-04	2589	1.03E-04
11285	7.55E-05	8612	3.12E-04	5035	9.59E-05
16088	7.27E-05	11769	1.46E-04	13994	9.24E-05
13546	6.57E-05	15602	1.01E-04	14334	7.43E-05
14063	6.44E-05	8878	9.85E-05		
		15715	9.01E-05		
		8303	7.34E-05		
		14058	7.28E-05		





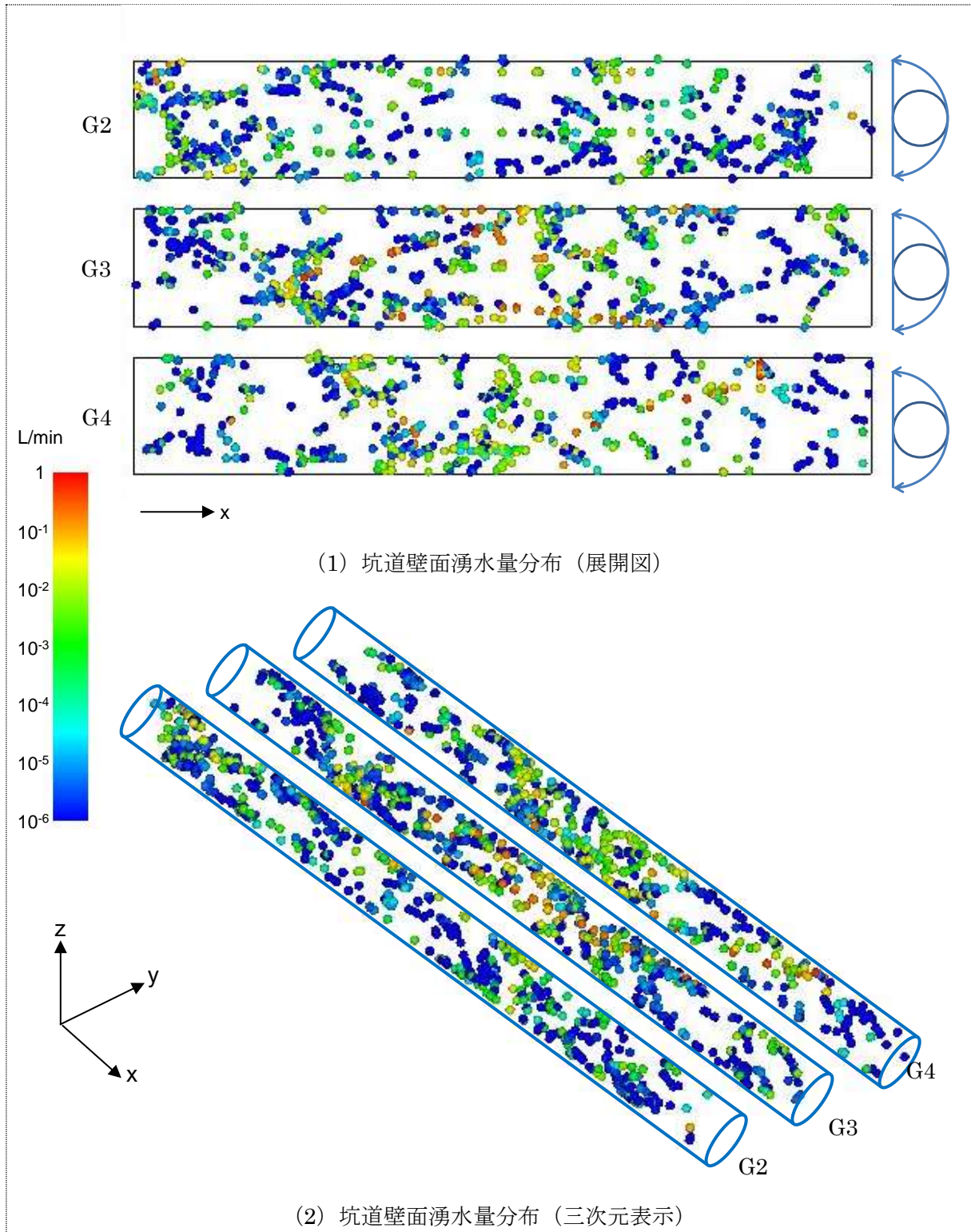


図 B-1 坑道壁面の湧水量分布 (HR08P, STEP0)

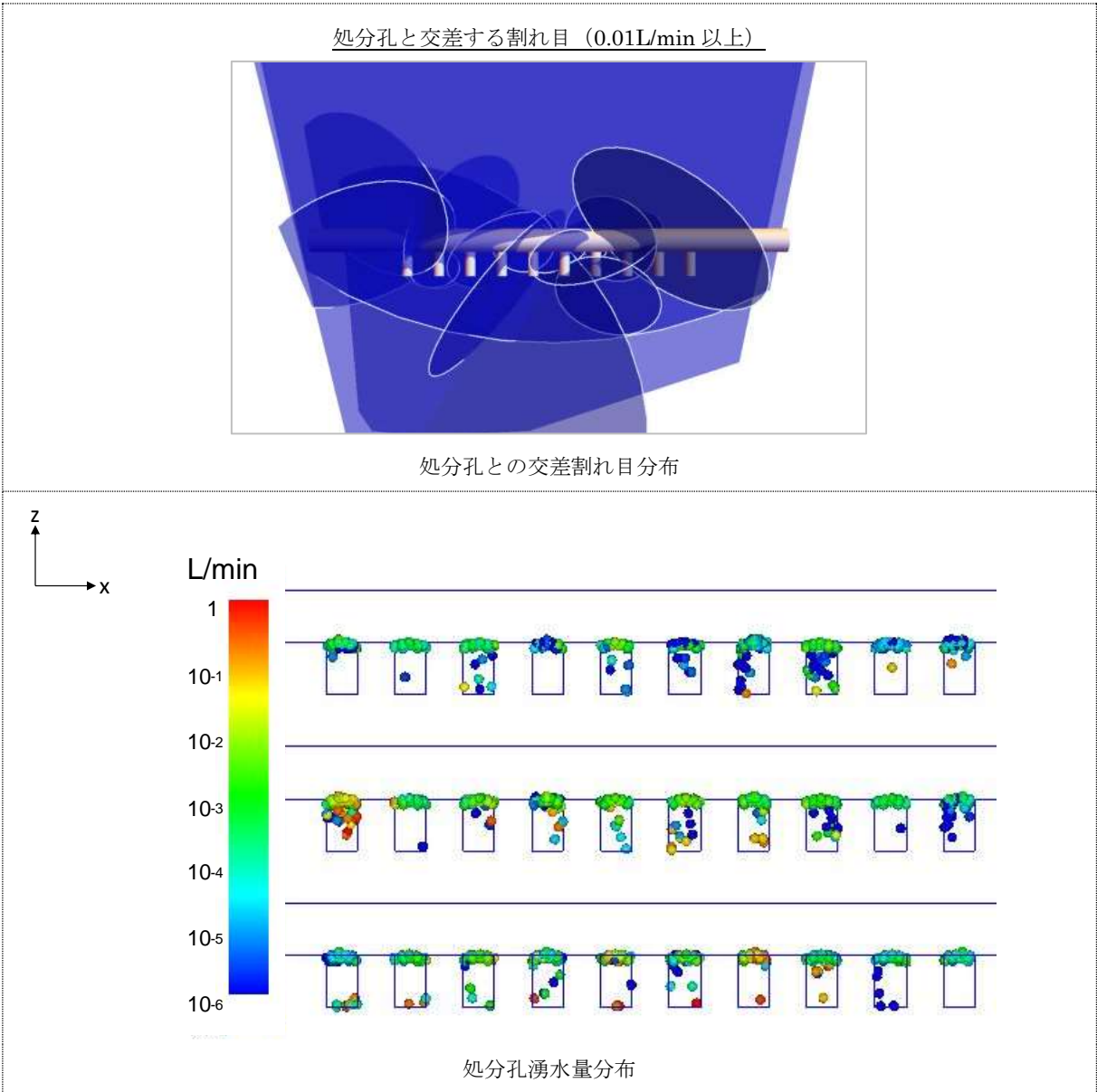


図 B-2 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HR08P, STEP0)



表 B-2 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR08P, STEP1)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
17145	8.28E-01	17145	5.14E+00	17147	4.61E+00
17147	2.76E-01	17147	3.49E+00	17143	1.62E+00
17112	2.48E-01	17143	1.38E+00	17141	5.36E-01
17118	2.22E-01	17128	1.26E+00	17098	4.13E-01
16938	1.23E-01	17141	3.31E-01	17128	4.08E-01
17037	9.90E-02	16556	2.86E-01	17074	2.40E-01
17124	8.78E-02	17113	2.66E-01	17047	1.75E-01
16788	7.17E-02	17047	2.62E-01	17126	1.64E-01
17101	6.67E-02	17088	2.26E-01	17084	1.53E-01
17015	5.79E-02	17017	1.66E-01	17061	1.35E-01
16746	4.24E-02	16657	1.24E-01	16206	1.09E-01
16969	3.17E-02	17002	1.14E-01	16946	7.29E-02
16959	2.49E-02	17061	1.12E-01	17017	6.35E-02
16877	2.19E-02	17124	1.08E-01	17038	5.96E-02
17028	1.83E-02	17118	8.88E-02	16429	5.01E-02
16618	1.42E-02	16971	8.54E-02	16811	4.36E-02
13865	1.30E-02	17074	5.55E-02	17035	4.06E-02
16814	9.56E-03	16906	5.01E-02	16556	3.71E-02
16789	8.72E-03	16901	4.66E-02	16949	3.34E-02
16379	7.88E-03	16660	2.97E-02	16922	2.50E-02
17032	6.88E-03	16625	2.64E-02	17088	2.20E-02
16856	6.11E-03	17037	2.47E-02	16996	1.73E-02
16427	4.74E-03	16500	2.09E-02	17002	1.46E-02
17114	3.93E-03	16258	1.79E-02	17113	3.65E-03
16552	3.32E-03	16448	1.78E-02	16767	2.69E-03
16344	2.17E-03	15756	9.21E-03	7334	2.25E-03
16310	1.66E-03	16160	6.04E-03	16546	7.28E-04
16855	1.53E-03	15169	5.06E-03	3352	1.29E-04
9299	8.25E-04	16789	1.94E-03	2829	1.07E-04
10602	2.93E-04	15225	5.77E-04	2589	1.03E-04
16088	7.62E-05	8612	3.13E-04	5035	9.60E-05
11285	7.56E-05	11769	1.47E-04	13994	9.46E-05
14063	6.94E-05	15602	1.01E-04	14334	7.43E-05
13546	6.59E-05	15715	9.01E-05	7190	6.21E-05
		8303	7.34E-05		
		14058	7.28E-05		
		10625	7.28E-05		
		13715	6.26E-05		

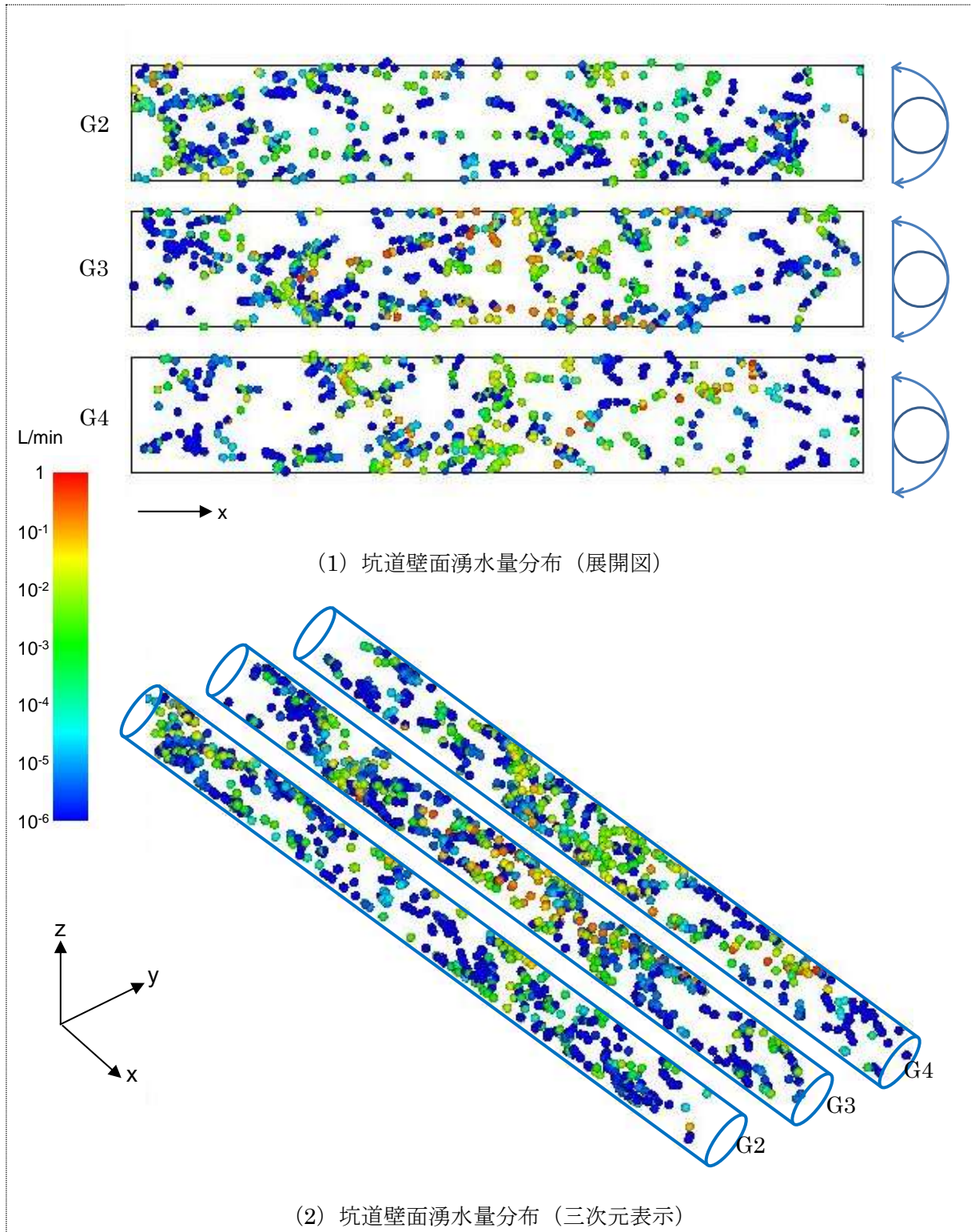


図 B-3 坑道壁面の湧水量分布 (HR08P, STEP1)

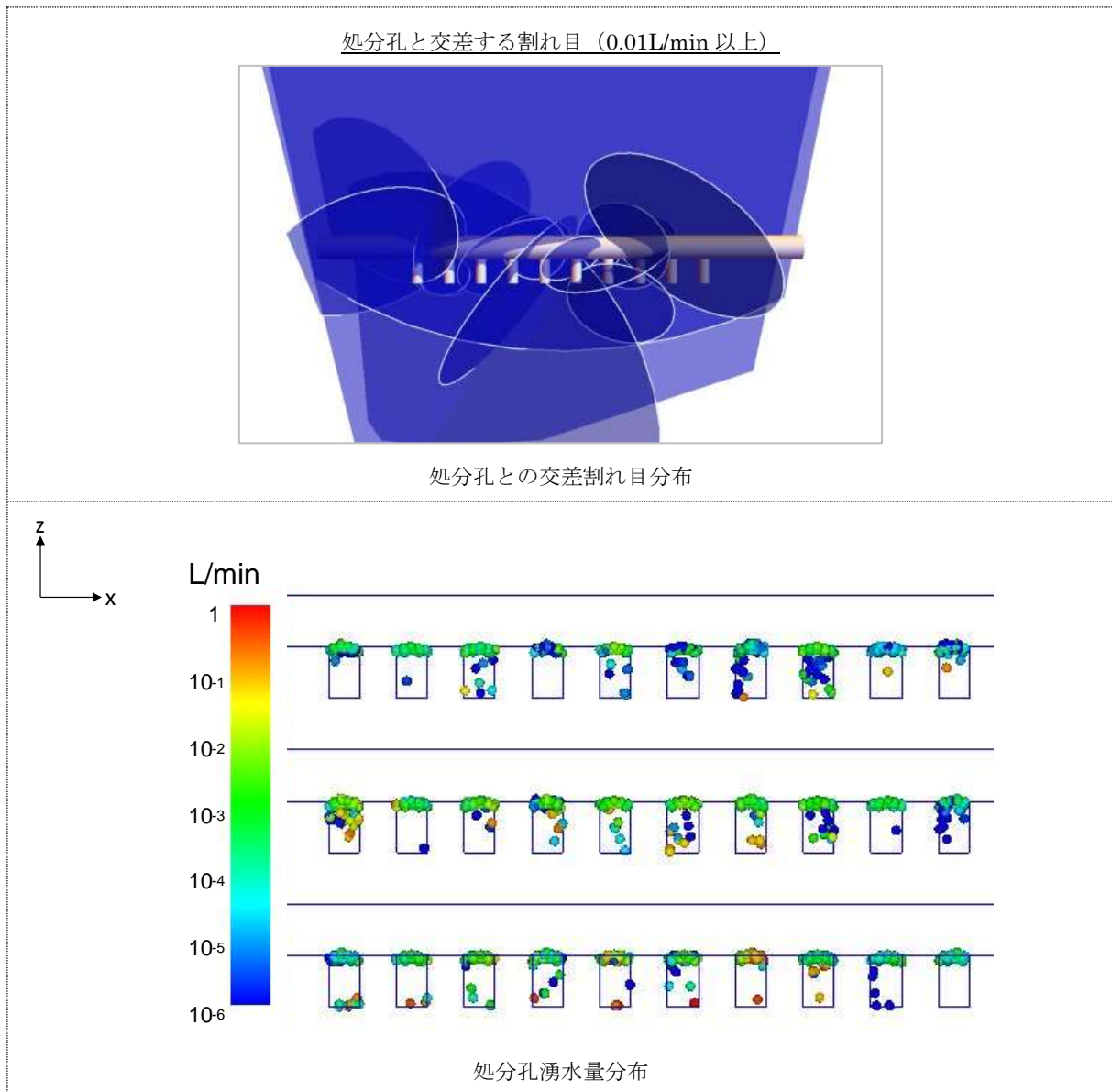


図 B-4 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HR08P, STEP1)

表 B-3 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR08P, STEP2)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
17145	8.28E-01	17145	5.19E+00	17147	4.61E+00
17147	2.76E-01	17147	3.49E+00	17143	1.62E+00
17112	2.49E-01	17143	1.43E+00	17141	5.39E-01
17118	2.22E-01	17128	1.27E+00	17098	4.13E-01
16938	1.23E-01	17141	3.44E-01	17128	4.10E-01
17037	9.90E-02	16556	2.94E-01	17074	2.44E-01
17124	8.80E-02	17113	2.66E-01	17047	1.77E-01
16788	7.18E-02	17047	2.62E-01	17126	1.65E-01
17101	6.69E-02	17088	2.26E-01	17084	1.53E-01
17015	5.79E-02	17017	1.85E-01	17061	1.35E-01
16746	4.24E-02	16657	1.36E-01	16206	1.09E-01
16969	3.17E-02	17002	1.25E-01	16946	7.29E-02
16959	2.52E-02	17061	1.12E-01	17017	6.41E-02
16877	2.19E-02	17124	1.09E-01	17038	5.96E-02
17028	1.84E-02	16971	9.98E-02	16429	5.01E-02
13865	1.44E-02	17118	8.89E-02	16811	4.40E-02
16618	1.42E-02	17074	5.84E-02	17035	4.10E-02
16814	9.56E-03	16906	5.02E-02	16556	3.75E-02
16789	8.73E-03	16901	4.66E-02	16949	3.36E-02
16379	7.90E-03	16660	2.71E-02	16922	2.51E-02
17032	6.90E-03	16625	2.64E-02	17088	2.21E-02
16856	6.13E-03	17037	2.47E-02	16996	1.73E-02
16427	5.03E-03	16500	2.09E-02	17002	1.47E-02
17114	3.95E-03	16258	1.82E-02	17113	3.65E-03
16552	3.32E-03	16448	1.79E-02	16767	2.72E-03
16344	2.18E-03	15756	9.21E-03	7334	2.25E-03
16310	1.67E-03	16160	6.05E-03	16546	7.29E-04
16855	1.53E-03	15169	5.12E-03	3352	1.29E-04
9299	8.28E-04	16789	1.94E-03	2829	1.07E-04
10602	2.94E-04	15225	5.77E-04	2589	1.03E-04
16088	7.62E-05	8612	3.19E-04	5035	9.63E-05
11285	7.57E-05	11769	1.51E-04	13994	9.48E-05
14063	6.94E-05	15602	1.01E-04	14334	7.45E-05
13546	6.63E-05	15715	9.01E-05	7190	6.22E-05
		14058	7.55E-05		
		8303	7.34E-05		
		10625	7.28E-05		
		13715	6.27E-05		
		8127	6.16E-05		



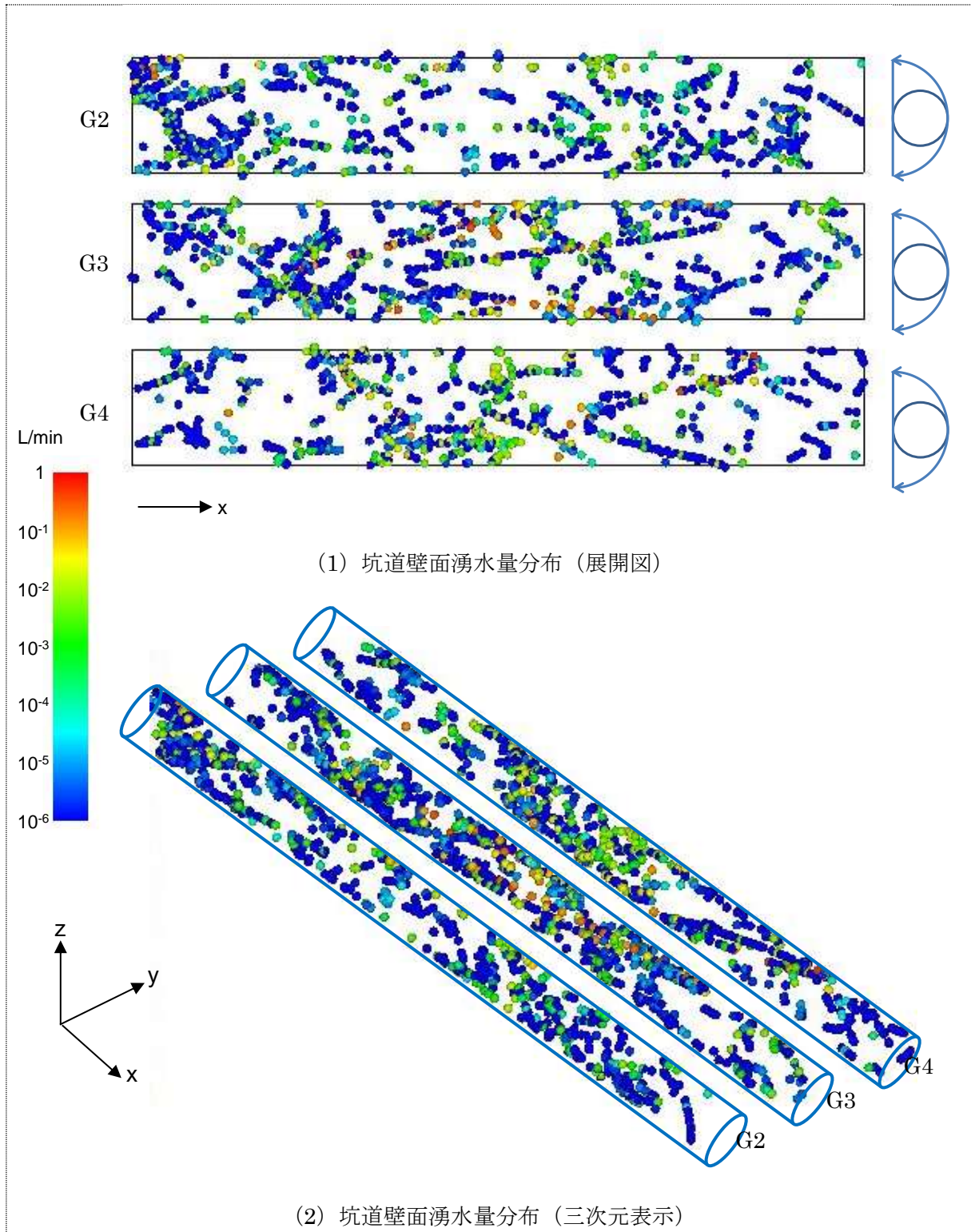


図 B-5 坑道壁面の湧水量分布 (HR08P, STEP2)

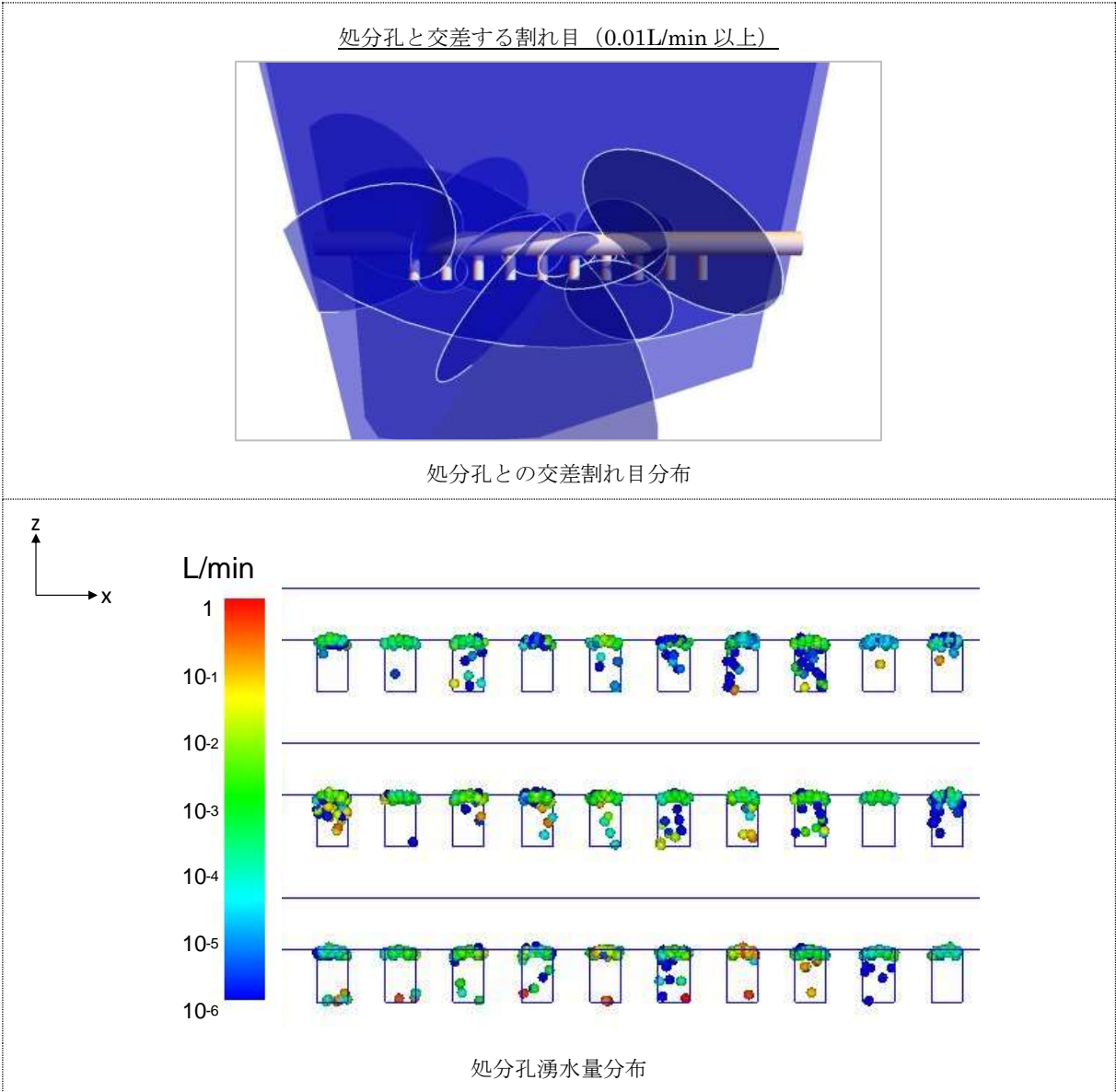


図 B-6 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HR08P, STEP2)

表 B-4 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR08P, STEP3)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
17145	8.37E-01	17145	5.20E+00	17147	4.61E+00
17147	2.80E-01	17147	2.63E+00	17143	1.65E+00
17112	2.49E-01	17143	1.43E+00	17141	5.39E-01
17118	2.29E-01	17128	1.28E+00	17098	4.20E-01
16938	1.24E-01	17141	3.45E-01	17128	4.19E-01
17037	1.00E-01	16556	2.96E-01	17074	2.45E-01
17124	8.80E-02	17113	2.84E-01	17047	1.80E-01
16788	7.18E-02	17088	2.40E-01	17126	1.77E-01
17101	6.69E-02	17017	1.85E-01	17084	1.57E-01
17015	5.89E-02	16657	1.37E-01	17061	1.38E-01
16746	4.40E-02	17047	1.35E-01	16206	1.09E-01
16969	3.24E-02	17002	1.25E-01	16946	7.29E-02
16959	2.52E-02	17061	1.15E-01	17017	6.45E-02
16877	2.20E-02	17124	1.09E-01	17038	6.03E-02
17028	1.88E-02	16971	1.00E-01	16429	5.01E-02
16618	1.46E-02	17118	9.53E-02	16811	4.51E-02
13865	1.44E-02	17074	5.85E-02	17035	4.10E-02
16814	9.83E-03	16906	5.02E-02	16556	3.77E-02
16789	8.98E-03	16901	4.81E-02	16949	3.40E-02
16379	7.91E-03	16660	2.71E-02	16922	2.53E-02
17032	6.91E-03	16625	2.64E-02	17088	2.29E-02
16856	6.13E-03	17037	2.61E-02	16996	1.76E-02
16427	5.04E-03	16500	2.29E-02	17002	1.50E-02
17114	3.95E-03	16258	1.82E-02	17113	3.74E-03
16552	3.37E-03	16448	1.79E-02	16767	2.72E-03
16344	2.19E-03	15756	9.24E-03	7334	2.30E-03
16310	1.67E-03	16160	6.09E-03	16546	7.31E-04
16855	1.53E-03	15169	5.12E-03	3352	1.29E-04
9299	8.26E-04	16789	2.03E-03	2829	1.07E-04
10602	2.94E-04	15225	6.29E-04	2589	1.03E-04
16088	7.76E-05	8612	3.21E-04	13994	1.00E-04
11285	7.57E-05	11769	1.52E-04	5035	9.63E-05
14063	7.25E-05	15602	1.01E-04	14334	7.45E-05
13546	6.64E-05	15715	9.01E-05	7190	6.38E-05
		10625	7.76E-05		
		14058	7.56E-05		
		8303	7.34E-05		
		13715	6.59E-05		
		8127	6.57E-05		
		15045	6.16E-05		
		13933	6.02E-05		



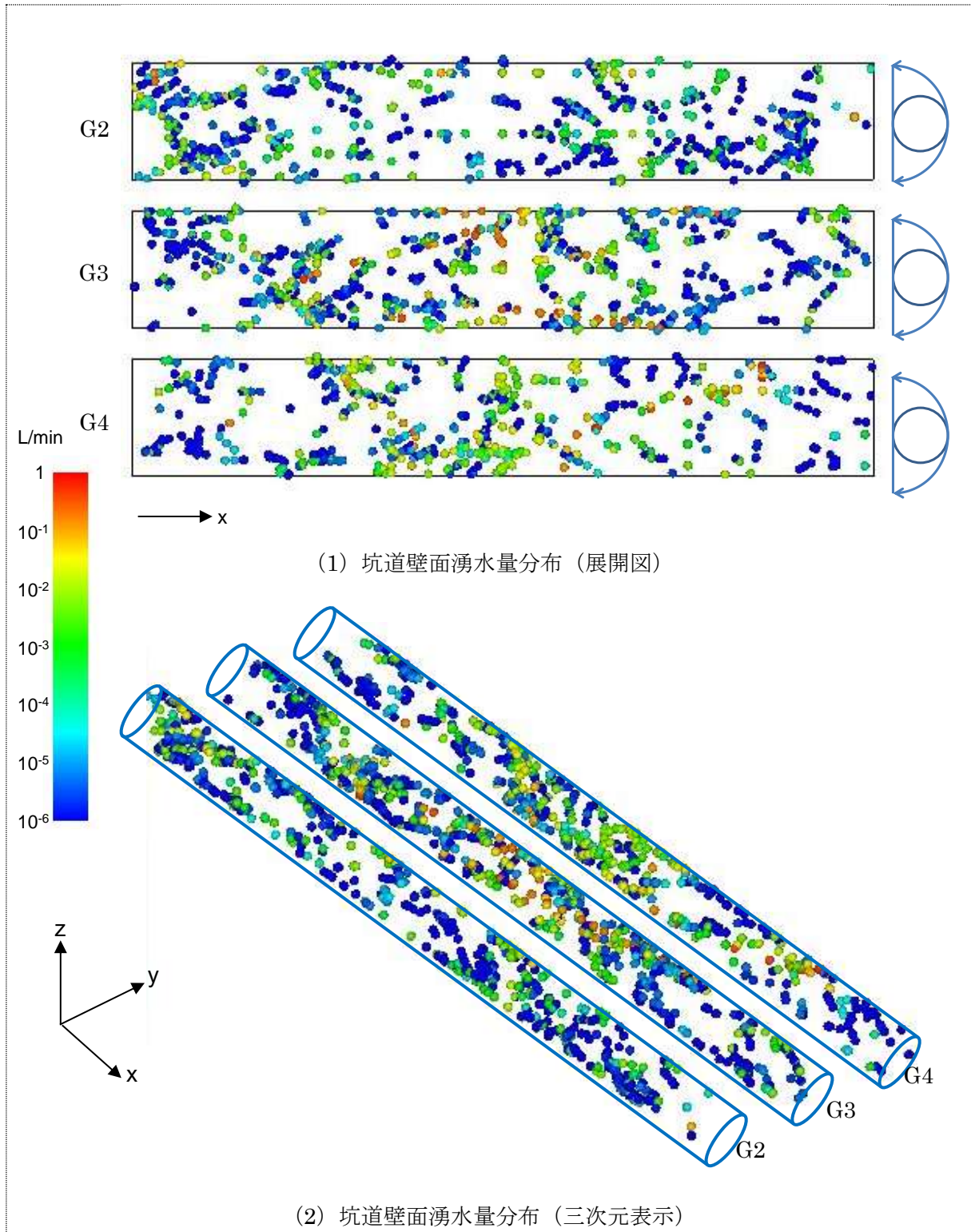


図 B-7 坑道壁面の湧水量分布 (HR08P, STEP3)

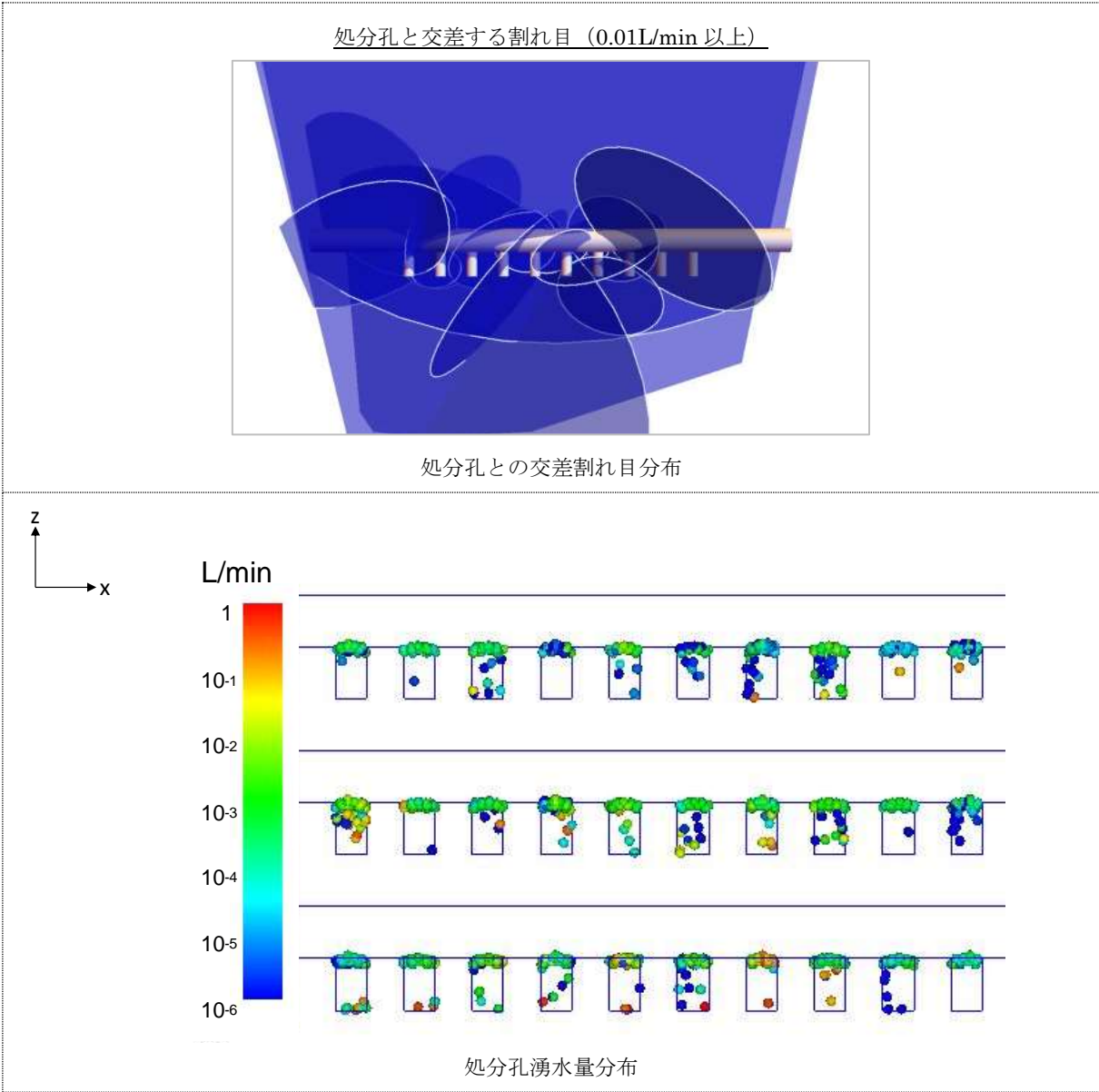


図 B-8 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HR08P, STEP3)

表 B-5 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR08P, STEP4)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
17145	8.30E-01	17145	5.20E+00	17147	4.61E+00
17147	2.77E-01	17147	2.36E+00	17143	1.65E+00
17112	2.49E-01	17143	1.43E+00	17141	5.39E-01
17118	2.23E-01	17128	1.28E+00	17098	4.21E-01
16938	1.23E-01	17141	3.45E-01	17128	4.20E-01
17037	9.93E-02	16556	2.96E-01	17074	2.45E-01
17124	8.80E-02	17113	2.82E-01	17047	1.80E-01
16788	7.18E-02	17088	2.33E-01	17126	1.78E-01
17101	6.69E-02	17017	1.85E-01	17084	1.57E-01
17015	5.82E-02	16657	1.37E-01	17061	1.38E-01
16746	4.28E-02	17047	1.37E-01	16206	1.09E-01
16969	3.19E-02	17002	1.25E-01	16946	7.29E-02
16959	2.52E-02	17061	1.15E-01	17017	6.45E-02
16877	2.20E-02	17124	1.09E-01	17038	6.04E-02
17028	1.88E-02	16971	1.00E-01	16429	5.01E-02
13865	1.44E-02	17118	8.38E-02	16811	4.51E-02
16618	1.44E-02	17074	5.85E-02	17035	4.10E-02
16814	9.64E-03	16906	5.02E-02	16556	3.77E-02
16789	8.79E-03	16901	4.76E-02	16949	3.40E-02
16379	7.91E-03	16660	2.71E-02	16922	2.53E-02
17032	6.91E-03	16625	2.64E-02	17088	2.30E-02
16856	6.13E-03	17037	2.52E-02	16996	1.77E-02
16427	5.03E-03	16258	1.82E-02	17002	1.50E-02
17114	3.95E-03	16448	1.79E-02	17113	3.75E-03
16552	3.34E-03	15756	9.25E-03	16767	2.72E-03
16344	2.19E-03	16160	6.08E-03	7334	2.30E-03
16310	1.67E-03	15169	5.12E-03	16546	7.31E-04
16855	1.53E-03	16500	2.90E-03	3352	1.29E-04
9299	8.28E-04	16789	1.96E-03	2829	1.07E-04
10602	2.94E-04	8612	3.21E-04	2589	1.03E-04
16088	7.65E-05	11769	1.52E-04	13994	1.01E-04
11285	7.57E-05	15602	1.01E-04	5035	9.63E-05
14063	7.02E-05	15715	9.01E-05	14334	7.45E-05
13546	6.63E-05	14058	7.56E-05	7190	6.40E-05
		10625	7.53E-05		
		8303	7.34E-05		
		13715	6.57E-05		
		8127	6.35E-05		
		15045	6.10E-05		
		13933	6.04E-05		

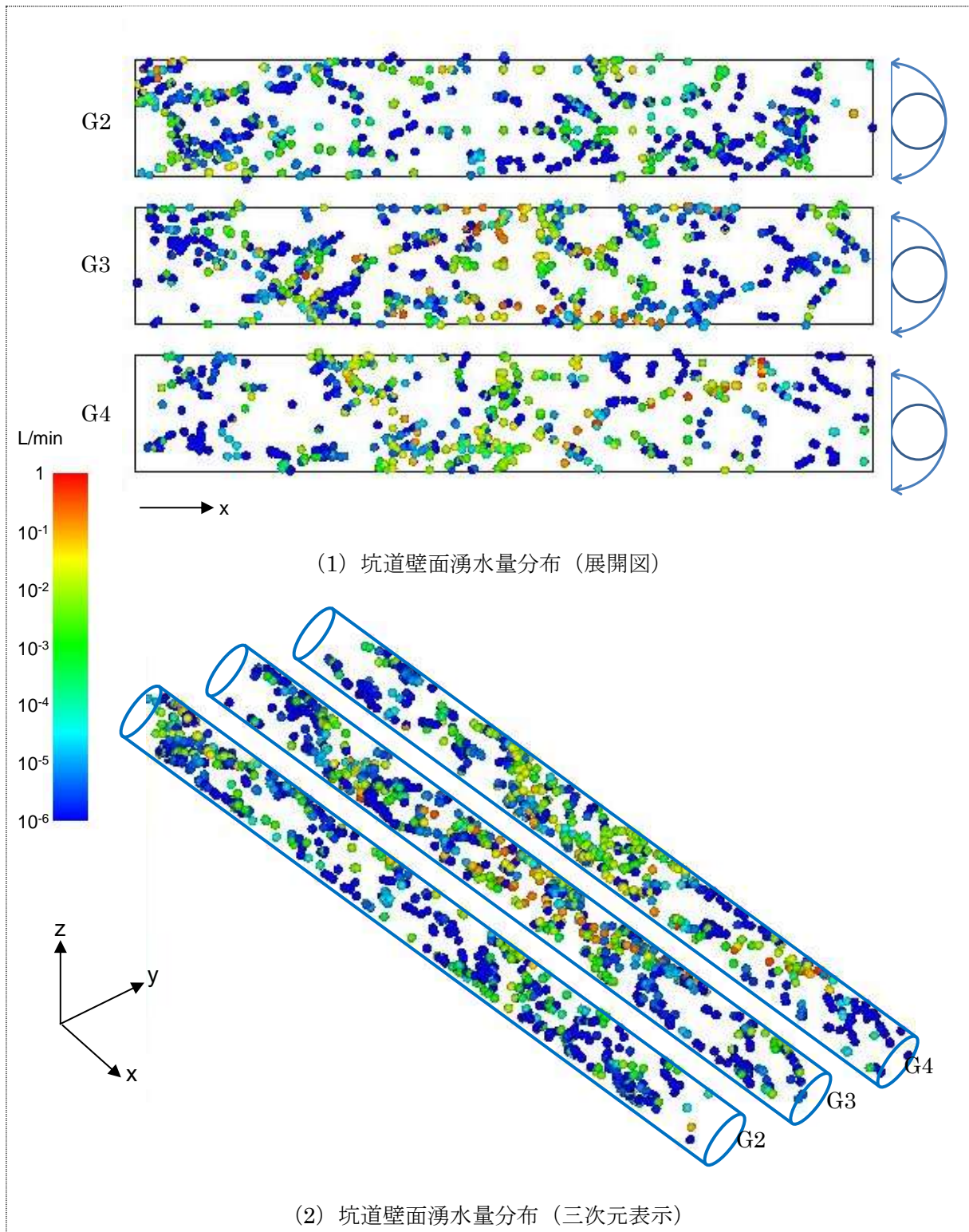


図 B-9 坑道壁面の湧水量分布 (HR08P, STEP4)



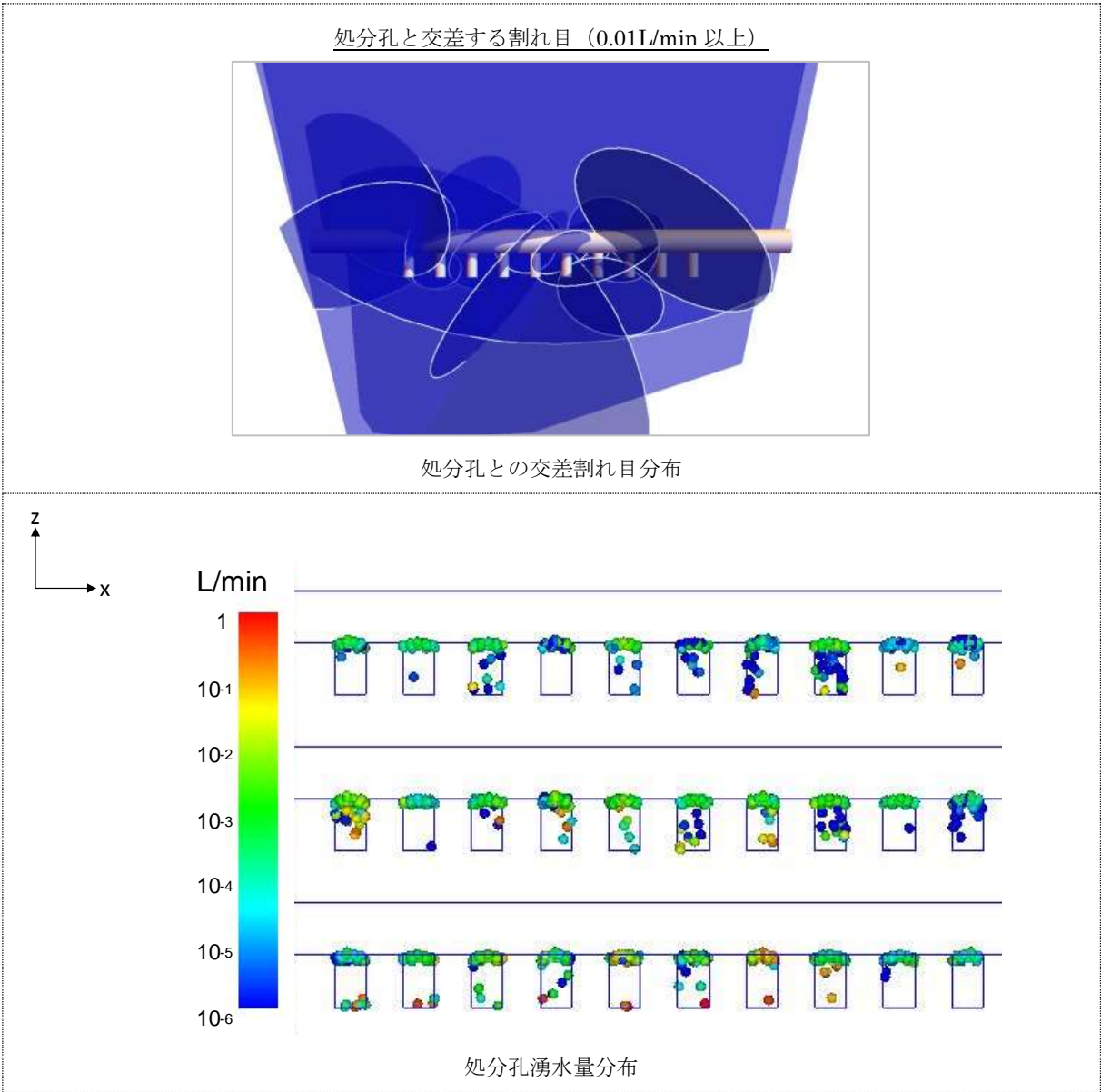


図 B-10 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HR08P, STEP4)

表 B-6 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR08P, STEP5)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
17145	8.29E-01	17145	5.16E+00	17147	4.61E+00
17147	2.77E-01	17147	2.09E+00	17143	1.65E+00
17112	2.49E-01	17143	1.44E+00	17141	5.40E-01
17118	2.23E-01	17128	1.29E+00	17128	4.24E-01
16938	1.23E-01	17141	3.45E-01	17098	4.22E-01
17037	9.91E-02	16556	2.97E-01	17074	2.45E-01
17124	8.80E-02	17113	2.83E-01	17047	1.82E-01
16788	7.19E-02	17088	2.32E-01	17126	1.79E-01
17101	6.69E-02	17017	1.85E-01	17084	1.58E-01
17015	5.82E-02	16657	1.39E-01	17061	1.39E-01
16746	4.26E-02	17002	1.25E-01	16206	1.09E-01
16969	3.21E-02	17061	1.16E-01	16946	7.29E-02
16959	2.52E-02	17124	1.09E-01	17017	6.46E-02
17028	2.23E-02	16971	1.00E-01	17038	6.05E-02
16877	2.20E-02	17047	9.02E-02	16429	5.01E-02
16618	1.46E-02	17118	8.32E-02	16811	4.56E-02
13865	1.44E-02	17074	5.86E-02	17035	4.10E-02
16814	9.66E-03	16906	5.02E-02	16556	3.78E-02
16789	8.75E-03	16901	4.75E-02	16949	3.41E-02
16379	7.91E-03	16660	2.71E-02	16922	2.54E-02
17032	6.91E-03	16625	2.64E-02	17088	2.31E-02
16856	6.13E-03	17037	2.50E-02	16996	1.78E-02
16427	5.04E-03	16258	1.82E-02	17002	1.51E-02
17114	3.95E-03	16448	1.79E-02	17113	3.77E-03
16552	3.42E-03	16160	6.39E-03	16767	2.72E-03
16344	2.19E-03	15169	5.13E-03	7334	2.31E-03
16310	1.67E-03	16500	2.91E-03	16546	7.33E-04
16855	1.53E-03	16789	1.95E-03	3352	1.29E-04
9299	8.29E-04	15756	7.73E-04	2829	1.07E-04
10602	2.94E-04	8612	3.22E-04	2589	1.03E-04
16088	7.64E-05	11769	1.52E-04	13994	1.02E-04
11285	7.58E-05	15602	1.01E-04	5035	9.64E-05
14063	6.98E-05	13933	9.45E-05	14334	7.45E-05
13546	6.63E-05	15715	9.01E-05	7190	6.44E-05
		14058	7.56E-05		
		10625	7.47E-05		
		8303	7.34E-05		
		13715	6.58E-05		
		8127	6.30E-05		
		15045	6.10E-05		

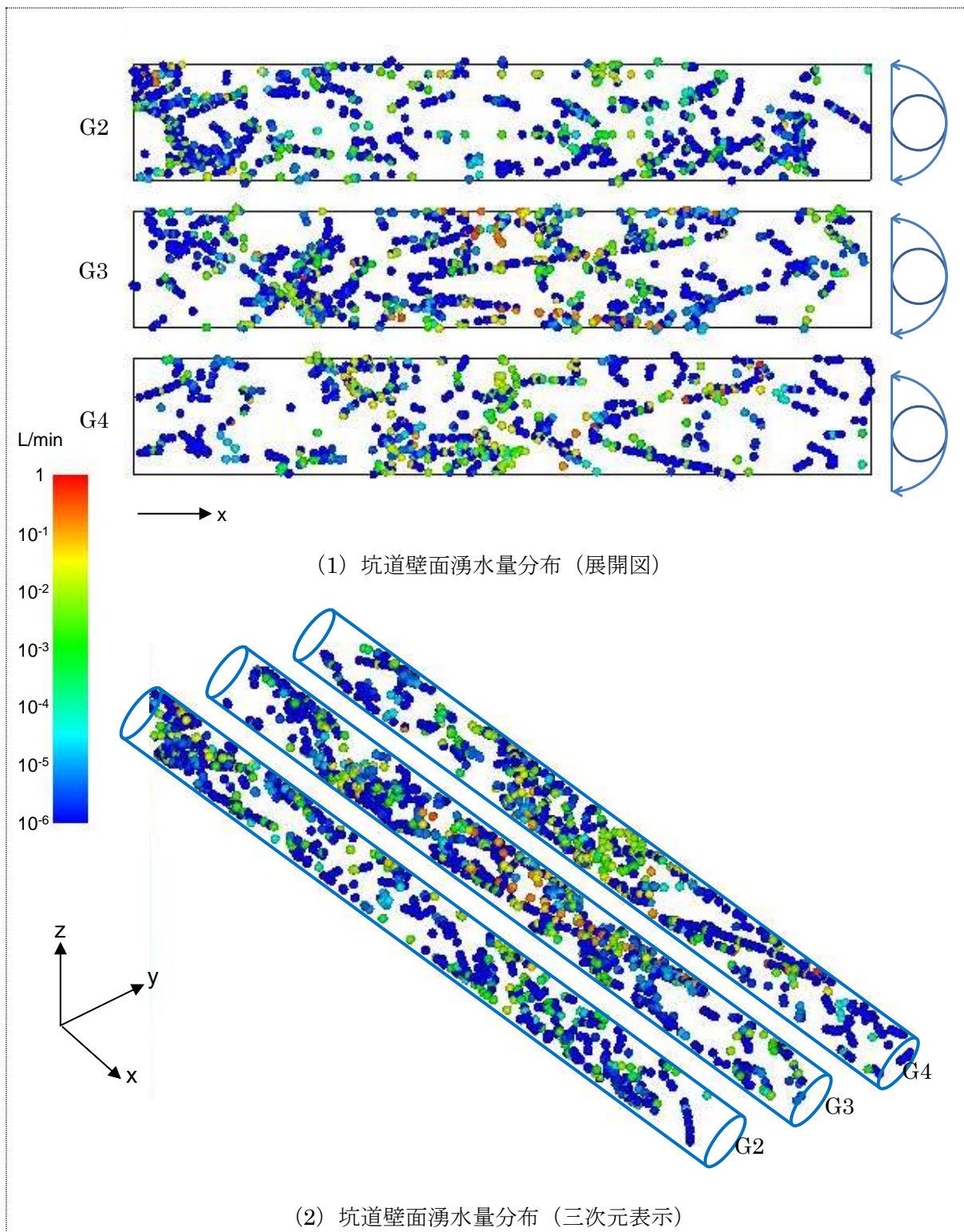


図 B-11 坑道壁面の湧水量分布 (HR08P, STEP5)



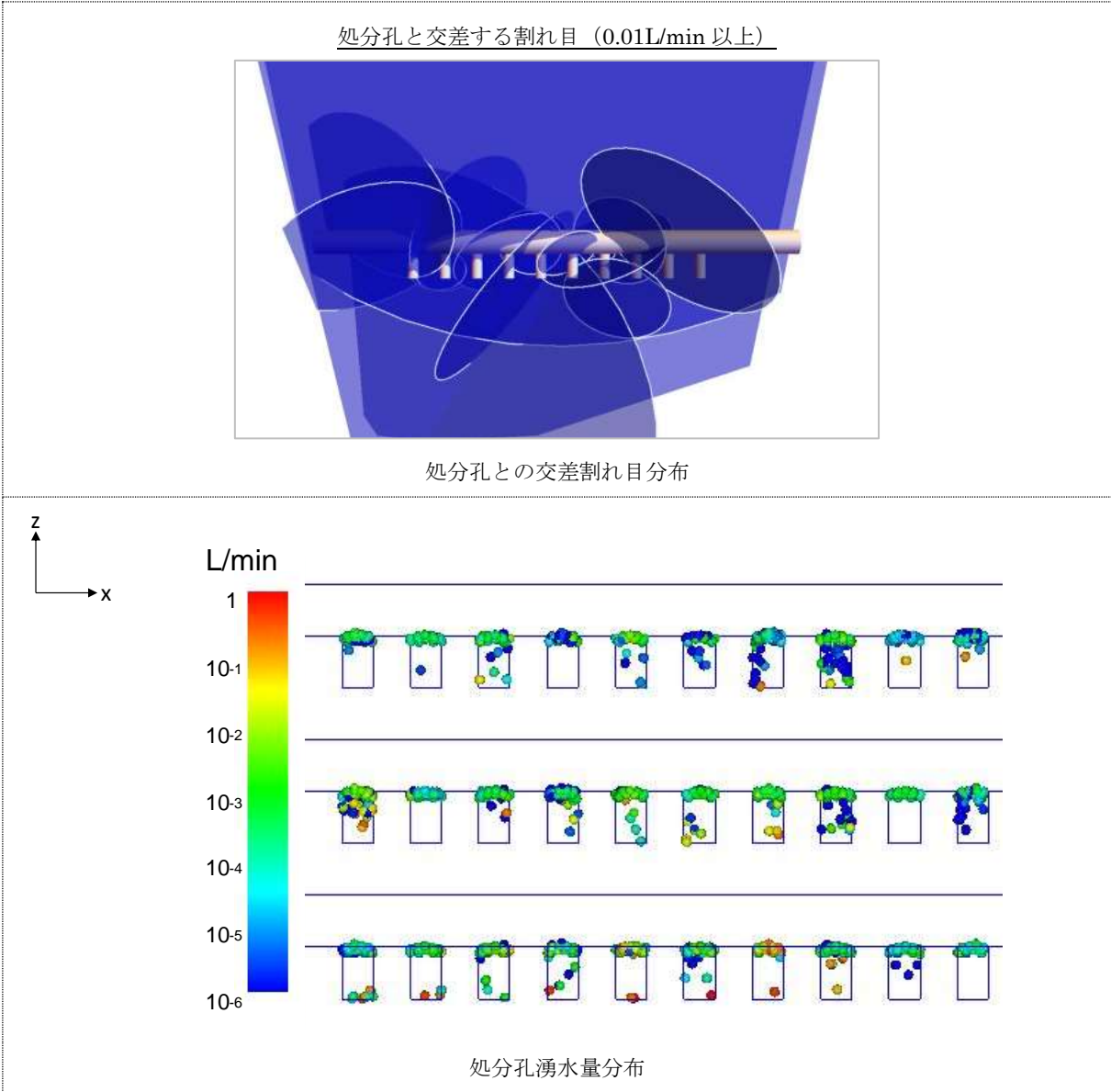


図 B-12 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HR08P, STEP5)

表 B-7 坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果 (HR08P, STEP6)

G2(-12m)		G3(中心坑道)		G4(+12m)	
割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)	割れ目番号	流量 (L/min)
17145	8.29E-01	17145	4.95E+00	17147	4.61E+00
17147	2.77E-01	17147	2.09E+00	17143	1.65E+00
17112	2.50E-01	17143	1.45E+00	17141	5.47E-01
17118	2.23E-01	17128	1.29E+00	17128	4.25E-01
16938	1.23E-01	17141	3.85E-01	17098	4.22E-01
17037	9.91E-02	16556	2.99E-01	17074	2.50E-01
17124	8.84E-02	17113	2.83E-01	17047	1.83E-01
16788	7.22E-02	17088	2.32E-01	17126	1.79E-01
17101	6.74E-02	17017	2.00E-01	17084	1.58E-01
17015	5.82E-02	16657	1.41E-01	17061	1.39E-01
16746	4.26E-02	17002	1.27E-01	16206	1.09E-01
16969	3.21E-02	16971	1.23E-01	16946	7.30E-02
16959	2.54E-02	17061	1.16E-01	17017	6.55E-02
17028	2.24E-02	17124	1.14E-01	17038	6.05E-02
16877	2.20E-02	17047	9.03E-02	16429	5.01E-02
16618	1.46E-02	17118	8.32E-02	16811	4.58E-02
13865	1.45E-02	17074	6.40E-02	17035	4.34E-02
16814	9.65E-03	16906	5.14E-02	16556	3.81E-02
16789	8.75E-03	16901	4.76E-02	16949	3.43E-02
16379	7.98E-03	16660	3.15E-02	16922	2.55E-02
17032	6.95E-03	16625	2.71E-02	17088	2.31E-02
16856	6.17E-03	17037	2.50E-02	16996	1.78E-02
16427	5.19E-03	16258	2.03E-02	17002	1.51E-02
17114	4.01E-03	16448	1.88E-02	17113	3.77E-03
16552	3.42E-03	16160	6.39E-03	16767	3.11E-03
16344	2.21E-03	15169	5.42E-03	7334	2.31E-03
16310	1.71E-03	16500	2.91E-03	16546	7.35E-04
16855	1.54E-03	16789	1.95E-03	3352	1.29E-04
9299	8.31E-04	15756	7.74E-04	2829	1.08E-04
10602	2.96E-04	8612	3.24E-04	2589	1.03E-04
16088	7.64E-05	11769	1.53E-04	13994	1.02E-04
11285	7.62E-05	15602	1.01E-04	5035	9.72E-05
14063	6.98E-05	13933	9.44E-05	14334	7.50E-05
13546	6.64E-05	15715	9.04E-05	7190	6.44E-05
14506	6.24E-05	14058	8.16E-05		
		10625	7.47E-05		
		8303	7.35E-05		
		13715	6.59E-05		
		2943	6.57E-05		
		8127	6.30E-05		
		12285	6.25E-05		
		15045	6.10E-05		

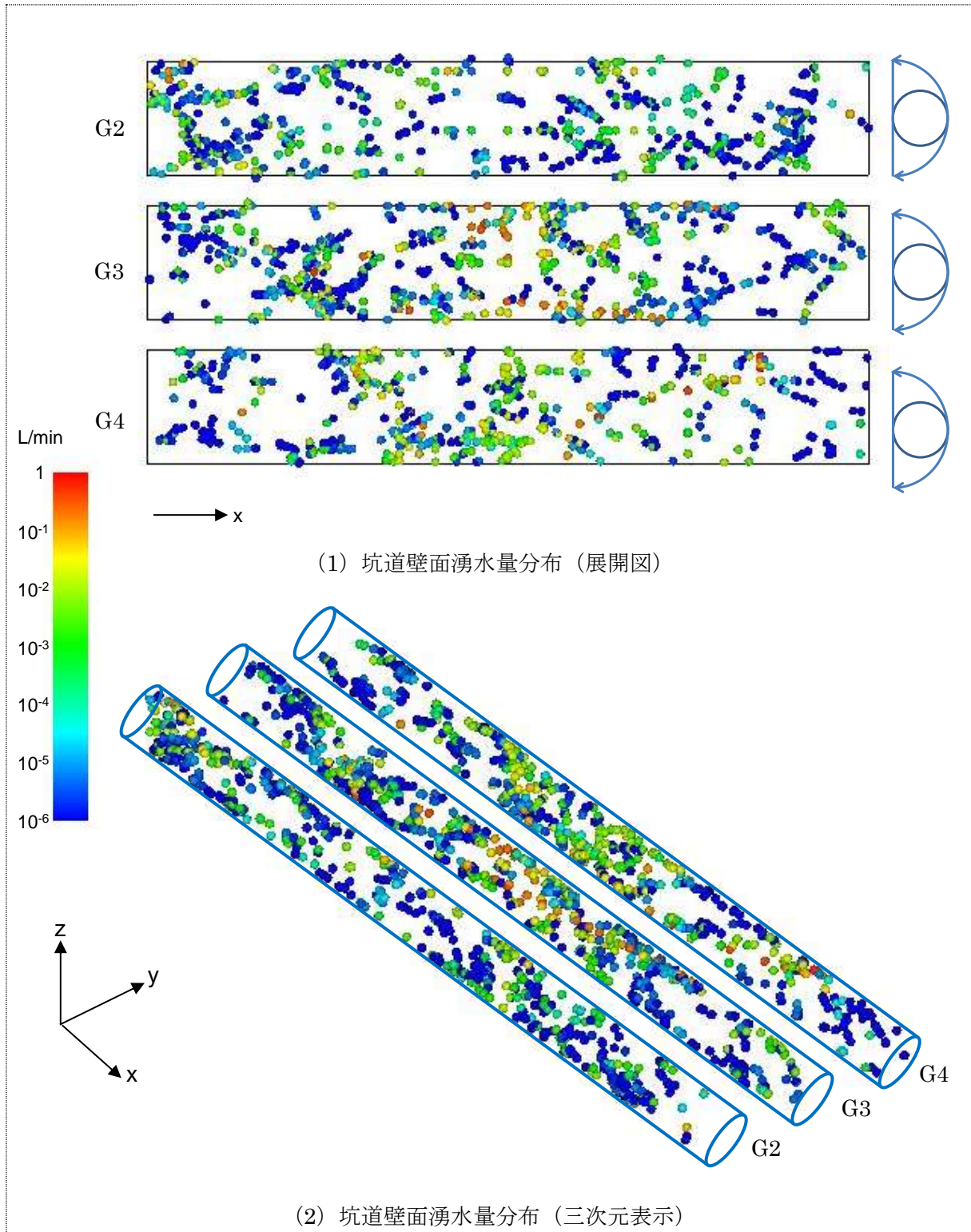


図 B-13 坑道壁面の湧水量分布 (HR08P, STEP6)

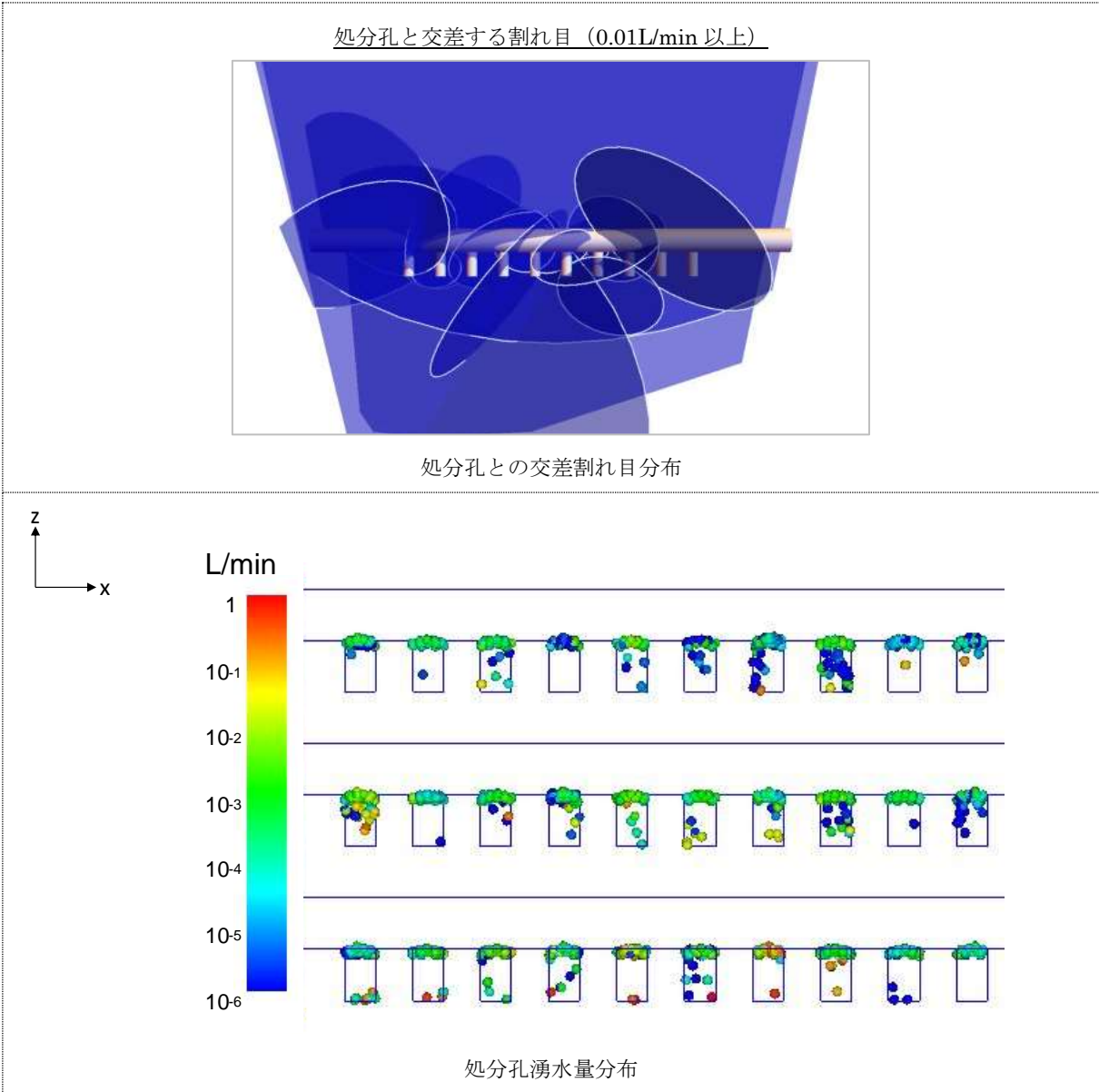


図 B-14 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布 (HR08P, STEP6)

## 第7章 緩衝材施工方法に関する検討

### 7.1 背景と目的

本事業では、人工バリア全体の設計・施工仕様の策定に関する調査・検討を行っており、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を進めている。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 29 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）に関する考え方を整理する計画である。このような整理では、緩衝材が維持すべき機能を明確にした上で、これまでに得られている試験結果などの知見やデータに基づき、緩衝材の仕様等に関する定量的な情報の取りまとめも必要となる。

本業務では、上記のような緩衝材に関する平成 29 年度の取りまとめに向けて、ベースとなる知見等の整理を行い、知見やデータ等の取りまとめの方法（整理の視点や体系の具体化など）ならびに設計や施工に関連する指標や規格値等の提示方法を検討した。併せて、更なる拡充が必要となる知見やデータなど、今後の課題についても整理した。

### 7.2 緩衝材機能に係わる文献調査

#### 7.2.1 実施内容

緩衝材施工方法に関する考え方の整理に向けて、本事業のこれまでの取組の成果に加えて、関連する既存の調査研究の成果ならびに知見やデータなど、整理のベースとなる最新の情報（論文や公開報告書等）に関する調査及び収集を行った。

整理においては以下の事象を対象とする。

- ✓ 緩衝材に生じる挙動に関する事象：膨潤挙動、化学変質、力学性能変化、地下水浸潤、ガス移行、熱影響、パイピングなど
- ✓ 緩衝材の設計要件：自己シール性、低透水性、自己修復性、微生物影響、製作施工性、コロイド濾過能など
- ✓ 緩衝材の特性評価方法：乾燥密度、モンモリロナイト含有率、陽イオン交換容量、完全飽和パラメータ（膨潤特性）、随伴鉱物組成など
- ✓ 緩衝材の施工方法：ブロック工法、吹付け工法、転圧締固め工法、ペレット充填工法など

#### 7.2.2 調査の対象とした文献

本調査では、最新の知見を網羅的にカバーする観点も含め、以下に示す①～③の文献を調査

対象とした。

- ①本事業のこれまでの取組みの成果：処分システム工学確証技術開発、処分システム工学確証技術開発などの成果
- ②わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分に関する取りまとめ報告書
  - 日本原子力研究開発機構（以下、JAEA と称す）の地層処分研究開発第 2 次取りまとめの報告書[1]（以下、「JAEA 第 2 次取りまとめ」と称す）
  - 原子力発電環境整備機構（以下、NUMO と称す）の地層処分事業の安全確保（2010 年度版）に関する技術報告書の更新版となる、包括的技術報告書「わが国における安全な地層処分の実現性 ～サイト選定で想定される多様な地質環境を対象としたセーフティケース～」の 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版 PDF 関連成果（以下、「NUMO セーフティケース」と称す）
- ③最新の知見を網羅的にカバーする観点で、原子力学会（春の年会、秋の大会）における緩衝材に関する発表（キーワード：緩衝材、ベントナイト、モンモリロナイト）のうち、過去 3 年間分の論文（2016 年、2015 年、2014 年）

### 7.2.3 実施手順

#### (1) 「文献リスト」の作成

先ず収集した論文については記載内容の概要を把握するため、「文献リスト」を作成した。文献リストには下記の項目について内容を記載、整理した。

- 発行年
- 和文標題
- 英文標題
- 著者名
- 資料名
- 巻号ページ(発行年月日)
- 要約
- キーワード

なお、各文献の番号（文献リストの PDF-No.）については、下記のような手順で付番を行った。

- ・先ず、並行して文献収集を行えるように、下記のように区分して番号付け（PDF-No.）を行った。

000 番台：①本事業のこれまでの取組み成果関連  
（その他のベントナイト関連論文も含む）

200 番台：②JAEA 第 2 次とりまとめ、及び NUMO セーフティケース

300 番台：③原子力学会

- ・引き続き、文献の精査を行い、非公開や重複などを削除した（そのため、番号が中抜けしている箇所あり）。
- ・文献リストにおいては、本業務との関連性を確認した（有、無を記載）。

## (2) 「文献シート」の作成

作成した「文献リスト」の各文献のうち、本調査において関連の大きい文献、及び具体的な記述のある文献（「文献リスト」の“関連”という列に、（文献シート）有として記載した文献）については、以下に示す事項を取りまとめた「文献シート」を作成した。

- 番号： 文献リストの PDF-No.
- 文献名： 文献のタイトル
- 執筆者： 代表者（2～3名）
- 設計・施工への反映すべき知見： 具体的な事項
- 考慮すべき項目に関する記載内容： 7.2.1 で記載した事象
- 緩衝材の仕様に関する整理の視点：下記に関連する事項の記載
  - ✓ 対象としている材料（ベントナイトの種類など）
  - ✓ 緩衝材の設計要件として考えられる事項（自己シール性など：2.1 参照）に関わる具体的な知見
- 緩衝材の整理の基軸：下記に関連する事項の記載
  - ✓ 例えば、緩衝材の特性に係るデータ整理において、主にクニゲル V1 の粘土密度を基軸としたこれまで整理に代わるようなデータの整理方法など。
- その他：その他留意すべき事項の記載

具体的には表 7.2.3-1 に示すように、表形式で整理する。



表 7.2.3-1 緩衝材機能に係る文献調査（記載方法）

1.番号	文献リストの PDF-No.
2.文献名	文献のタイトル
3.執筆者	代表者 2～3 名
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】・・・ 【施工】・・・ (関連しない項目は削除)
5.考慮すべき項目に関する記載内容	関連する事項の記載
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	関連する事項の記載
7.緩衝材の整理の基軸	関連する事項の記載
8.出典	文献の出典
9.その他	その他留意すべき事項の記載

(文献リスト「有のみ」の通し番号と、文献シートの通し番号は整合している。これらの順番は、PDF-No.の昇順と整合している。)

## 7.2.4 緩衝材機能に係わる文献調査結果

緩衝材機能に係る文献調査においては、合計 135 件の文献を収集し、「文献リスト」を作成した。そして、そのうち本調査に関わりの深い文献を対象に合計 80 件の「文献シート」を作成した。

作成した「文献リスト」及び「文献シート」は章末に示す。

## 7.3 緩衝材の仕様、施工に関する知見の整理

### 7.3.1 実施内容

本項では、緩衝材の設計、施工に関する体系的な考え方、関連する指標等に関する情報を収集、整理した。これまでに体系的な取りまとめが行われている、JAEA 第 2 次取りまとめ、及び NUMO セーフティケースに加え、対比用にスウェーデンの SR 報告書も含め、体系化に関する情報を収集、整理した。

### 7.3.2 実施手順

緩衝材の仕様、施工に関する知見の整理においては、対象とする文献に関して同じ方針を持って実施する必要がある。よって、本検討では以下の手順で実施する。

- 先ず、基本的な知見に基づき、緩衝材の仕様等の決定に向け、考え方を全体が俯瞰できるようにロジックツリーを用い整理する。

整理したロジックツリーを基軸に、わが国の考え方とスウェーデンの考え方を整理する。

### 7.3.3 実施手順

緩衝材の仕様、施工に関する知見の整理においては、対象とする文献に関して同じ方針を持って実施する必要がある。よって、本業務では以下の手順で実施する。

- 先ず、弊社の基本的な知見に基づき、緩衝材の仕様等の決定に向け、考え方を全体が俯瞰できるようにロジックツリーを用い整理する。
- 整理したロジックツリーを基軸に、わが国の考え方とスウェーデンの考え方を整理する。

### 7.3.4 緩衝材の仕様、施工に関するロジックツリーの構築

本検討では、緩衝材の設計・施工方法での最終ゴールと考えられる「主命題：要求性能を満足する緩衝材を構築することが可能である」に関する整理の基軸を、ロジックツリーを用いて提示する。具体的な構築方法としては、下記のように命題とそれを成立させる下部の命題を論理的に繋げていくことにより、ロジックツリーを形成する。

- 主命題：A サイトにおいて要求性能を満足する緩衝材を構築することが可能である。

A というサイトにおいて、高レベル地層処分の“要求性能を満足する緩衝材を構築することが可能である”という主命題を満足させるためには、以下の命題を満足する必要がある。

- ① “A サイトにおいて要求性能を満足する緩衝材の「設計」が可能である。” これには、材料の選定や仕様の設定などが含まれる。
- ② “A サイトにおいて要求性能を満足する緩衝材の「施工」が可能である。” これには、施工方法や品質管理方法がある。
- ③ “A サイトにおいて構築した緩衝材が長期性能を有していることの「確認」が可能である。” これはモニタリングなどを意味し、品質管理のみで対応するのであれば①と②のみで主命題を満足させる必要がある。もし、長期におけるモニタリングに依存するのであれば、①及び②に加え、③で主命題を満足させることになる。

- 命題：A サイトにおいて要求性能を満足する緩衝材の設計が可能である。

主命題をサポートするこの命題“A サイトにおいて要求性能を満足する緩衝材の設計が可能である”ことを満足させるためには、以下の副命題を満足する必要がある。

- ① “適した緩衝材の「材料を選定可能」である。” これには、要求を満足する性能があること、

その材料が十分な供給量を有していることなどが挙げられる。(例えば、この副命題においてデータ整理の基軸が関連)

- ② “要求性能を満足する「設計要件」が明らかである。”これには緩衝材に求める安全機能などを満足させる要件が必要になる。例えば、自己シール性や低透水性などである。(例えば、この副命題において整理の視点が関連)
- ③ “設計要件に基づき、A サイトにおいて適した「設計仕様を選定」できる。”これにはサイトの特性を踏まえることなどが求められる。

■ **命題：A サイトにおいて要求性能を満足する緩衝材の施工が可能である。**

主命題をサポートするこの命題“A サイトにおいて要求性能を満足する緩衝材の施工が可能である”ことを満足させるためには、以下の副命題を満足する必要がある。

- ① “設計仕様を満足できる場所を確保できる。”これには場所の選定に加え、グラウトなどの工学的対策も含まれる。
- ② “設計仕様を満足する施工方法がある。”これには遠隔・自動化での施工技術などが求められる。
- ③ “設計仕様を確認できる品質管理方法がある。”これには適切な品質管理項目は何か、その測定技術はあるのかなどが含まれる。

■ **命題：A サイトにおいて構築した緩衝材が長期性能を有していることの確認が可能である。**

主命題をサポートするこの命題“A サイトにおいて構築した緩衝材が長期性能を有していることの確認が可能である”ことを満足させるためには、以下の副命題を満足する必要がある。

- ① “確認すべき長期性能の評価に係るデータを取得できる。”ここには試験計画を立案できるか、適した計測技術はあるのかなどが含まれる。
- ② “取得したデータから長期性能を評価する解析技術がある。”ここには測定したデータを解釈できるか、先の予測は可能かなどが含まれる。

これらの全体を俯瞰できるように体系化する、つまりロジックツリーで表現すると、図 7.3.4-1 図 7.3.4-1 のようになる。

次項の総合評価での実際のロジックツリーの構築においては、樹形図をさらに細分化し、具体的な証拠(試験結果や解析結果)まで展開する。具体的な証拠とは前項で収集した論文や公開報告書等(引用文献も含む)となる。

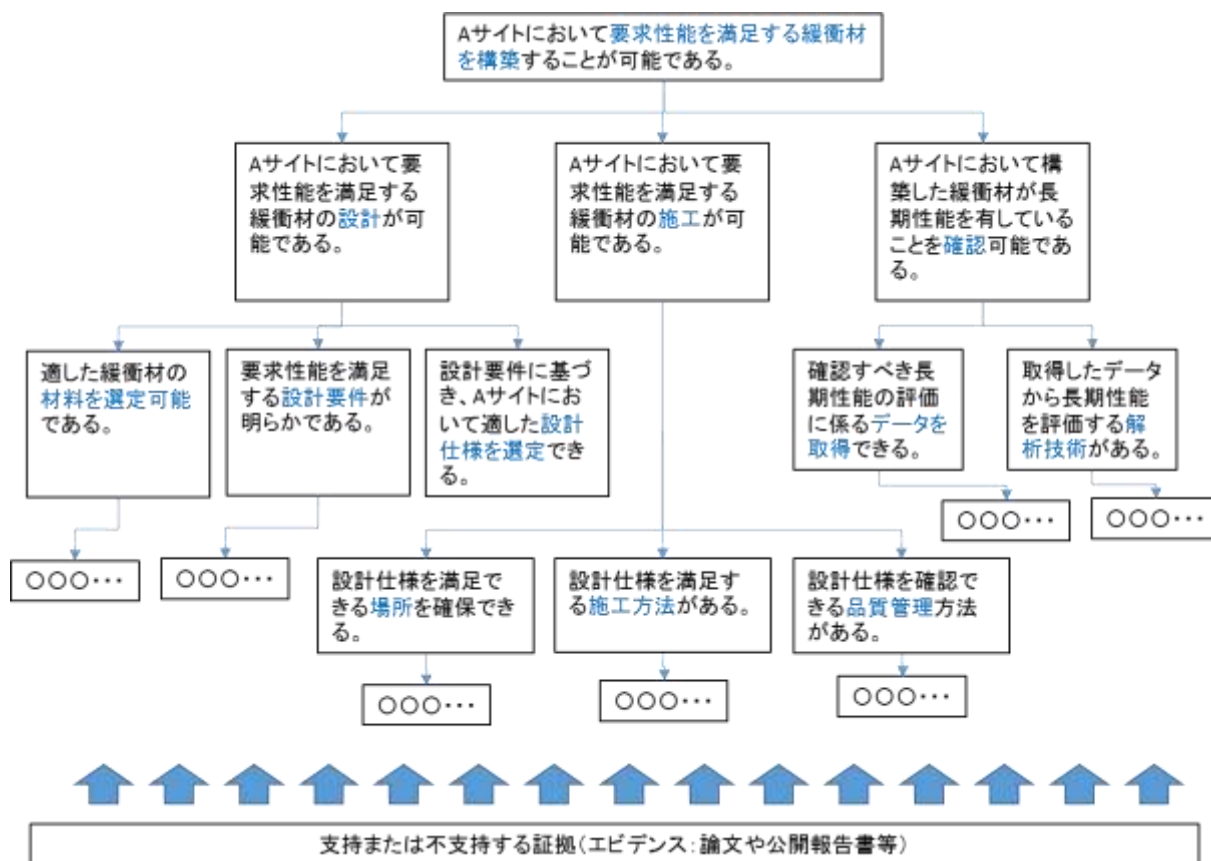


図 7.3.4-1 主命題に対するロジックツリー (3 階層目まで)

### 7.3.5 わが国における緩衝材の仕様、施工に関する知見の概要

前節の考え方に基づいてわが国における緩衝材の仕様、施工に関する知見を整理すると、以下のようになる。

#### (1) 設計関係

JAEA 第 2 次取りまとめ、及び NUMO セーフティケースにおける、緩衝材の設計の考え方(設計要件、設定仕様など)を以下に示す。

##### 1) JAEA 第 2 次取りまとめにおける緩衝材の設計の考え方

JAEA 第 2 次取りまとめでは、安全確保のための要件と人工バリアが成立するための要件の 2 つを挙げ、合計 10 個の設計要件が示されている。

##### a 安全確保のための要件 (JAEA 第 2 次取りまとめ IV-143)

- ① 低透水性を有すること： 低透水性を有することにより、緩衝材中の地下水の動きを遅くして、結果的に緩衝材中の物質の動きが遅くなるようにするとともに、ガラ

ス固化体の溶解速度や核種の溶出を抑制すること。

- ② 高い収着性を有すること： ガラス固化体から放射性核種が溶解した場合、それを収着することによって放射性核種の移動を抑制すること。
- ③ コロイドろ過能を有すること： 放射性核種がコロイドとして移動することを妨げること。
- ④ 化学的緩衝性を有すること： 地下水のpHや還元性等を化学的に緩衝することにより地下水の化学的条件を好ましいものとする。

b 人工バリアが成立するための要件 (JAEA 第2次取りまとめ IV-144)

- ① 自己シール性を有すること：水を含んだ際の膨潤性により、定置時の周辺岩盤との隙間や緩衝材内に生じた隙間を充填できること。
- ② 施工可能な締固め特性を有すること：既存の技術によって所要の密度が得られるような締固め特性を有すること。
- ③ 施工可能な強度を有すること：ブロック方式による施工を想定した場合、据え付け時のハンドリングに必要な力学特性を有していること。
- ④ 変形能を有すること：廃棄体埋設後、オーバーパックの機能が維持される期間、オーバーパックの腐食膨張と岩盤のクリープ変形を力学的に緩和できること。
- ⑤ 力学的に安定に支持できること：廃棄体埋設後、オーバーパックの機能が維持される期間、オーバーパックを力学的に安定に支持でき、地震に対しても健全性を維持できること。
- ⑥ 良好な熱伝導性を有すること：良好な熱伝導性を有することにより、ガラス固化体の発熱を外部に伝え、ガラス固化体の安定な形態を損なうような熱による変質を生じさせないこと。人工バリアの性能にかかわる熱移動、水分移動、核種移動、応力緩和などに関する性質に優位な影響を及ぼすような緩衝材の熱的な変質が生じないこと。

また上記要件に基づき、緩衝材の仕様は以下のように設定されている。

c 緩衝材の仕様設定 (JAEA 第2次取りまとめ IV-14)

- ① 緩衝材はクニゲルV1を用いたNa型ベントナイトとする。この場合、ベントナイト70%、ケイ砂30%で乾燥密度 $1.6\text{Mg/m}^3$ とする (JAEA第2次取りまとめ IV-146)
- ② 緩衝材の厚さは、現場締固め方式とブロック方式の場合において、上記の乾燥密度で、自己シール性 (ブロックの場合、オーバーパックと緩衝材の隙間2cmに対して2倍以上の膨潤量を確保)、及びオーバーパック耐圧厚さ (腐食代4cmを除いた必要耐圧厚さが15cm以下) との関係から70cmとする (JAEA第2次取りまとめ IV-148-153)。

## 2) NUMO セーフティケースの緩衝材の設計の考え方

NUMO セーフティケースでは、安全機能に係る要件として以下の6項目、実現性に関わる項目として1項目が提示されている。また各要件については、その指標と基準も示されており、それらもまとめて以下に記載する。【】内に指標、基準を記載

### a 安全機能に係る要件 (NUMO セーフティケース 資料4(3) 処分場の設計と工学技術 P4-13)

- ① 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。【指標：ペクレ数、基準：0.1以下】
- ② 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。【指標：膨潤率/隙間体積比、基準：2以上】
- ③ 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、緩衝材の密度を確認する。【指標：コロイド透過率、基準：0】
- ④ 微生物の影響の防止： 緩衝材内で微生物活動が生じないことを確認する。【指標：菌体数、基準：増殖しない】
- ⑤ 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決定する。【指標：緩衝材圧密反力と地下静水圧の合計、基準：オーバーパックの耐圧強度を下回り、急増しないこと】
- ⑥ 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。【指標：破過前後の透水係数の増加割合、基準：1以下】

### b 実現性に関わる要件 (NUMO セーフティケース 資料4(3) 処分場の設計と工学技術 P4-13)

- ① 製作施工性： 緩衝材ブロック製作可能な密度であることを確認する。【指標：有効粘土密度、基準：1.8Mg/m<sup>3</sup>以下】

また、緩衝材の評価項目として以下の3項目が提示され、上記要件と同様にその指標、及び基準が示されている。【】内に指標、基準を記載

### c 緩衝材の評価項目 (NUMO セーフティケース 資料4(3) 処分場の設計と工学技術 P4-14)

- ① 長期沈下挙動： 長期の圧密現象により沈下が継続したとしても、緩衝材の使用成立範囲に収まることを確認する。【指標：緩衝材厚さ、基準：400mm以上】
- ② 岩盤クリープ・オーバーパックの腐食膨張による影響： オーバーパックの腐食膨張や岩盤の変形による力学的な相互作用を考慮しても、長期にわたり物理的緩衝性を維持し、廃棄体を安定的に支持できることを、緩衝材仕様に対して確認する。【指標1：緩衝材圧密反力と地下水静水圧との合計、基準1：オーバーパックの耐圧強度】

を下回ること】【指標 2：緩衝材の破壊接近度、基準 2：1 未満、部分的な限界状態は許容】

- ③ 地震時の力学的安定性： 大規模な地震動に対しても、オーバーパックや緩衝材が力学的な安定性を損なわないことを、人工バリア仕様に対して確認する。【指標 1：緩衝材の破壊接近度、基準 1：1 未満、部分的な限界状態は許容】【指標 2：オーバーパックの Mises 応力、基準 2：降伏強度以下】

また、設計要件を満足する緩衝材の仕様範囲については以下のことが示されている。

- d 設計要件を満足する緩衝材の仕様範囲 (NUMO セーフティケース 資料 4 (3) 処分場の設計と工学技術 P4-21)

HLW 堅置き・ブロックと HLW 横置き・PEM の場合の緩衝材の膨潤後の有効粘土密度(Mg/m<sup>3</sup>)と緩衝材厚さ(mm)について、緩衝材の膨潤量が、緩衝材ブロックと岩盤および鋼製キャニスタとの隙間の 2 倍以上確保されるという条件で、緩衝材の必要厚さとして、領域が示され、この中の値として有効粘土密度約 1.4Mg/m<sup>3</sup>、緩衝材厚さとして 700mm が採用された。また、横置き PEM についても、有効粘土密度約 1.4Mg/m<sup>3</sup>、緩衝材厚さとして 700mm が採用された。(概ね JAEA 第 2 次取りまとめと同様)

## (2) 施工関係

JAEA 第 2 次取りまとめと NUMO セーフティケースにおいて、緩衝材の施工に対する考え方、要件等について以下に示す。

### 1) JAEA 第 2 次取りまとめにおける緩衝材の施工要件

#### a 緩衝材の製作方法と目標値

緩衝材の製作・施工技術として、現場締固め方式、ブロック定着方式、吹付け工法の 3 つが示された。現場締固め方式では、含水比=15% 管理値=15±2%、締固め後の乾燥密度=1.65Mg/m<sup>3</sup> が示されている (JAEA 第 2 次取りまとめ IV-163)。緩衝材ブロックは、最大乾燥密度 1.92 Mg/m<sup>3</sup>、最適含水比 13.6%とされている。堅置き方式では、全断面締固め施工のみで良い掘削工法、あるいは全断面締固めと部分締固めを併用して用いる内砕工法あるいは、直接工法が実現性が高い。ブロックの場合、現場施工と比べ含水比、乾燥密度のばらつきが小さく製作できる。隙間を充填した時の緩衝材の平均乾燥密度は 1.703 Mg/m<sup>3</sup>であった。緩衝材ブロックの分割数については、堅置き方式では、無分割ないしは 4 分割が候補であり、横置き方式については、6 分割が候補である。吹付け工法の場合は、鉛直下向きに厚さ 10~20cm/層、15 秒/回の締固めで 1.5~1.7Mg/m<sup>3</sup>の乾燥密度が得られている。吹付け工法の施工性、品質については、今後検討を進めることが述べられている。



## b 緩衝材の膨出対策

人工バリアに用いる緩衝材は膨潤性の材料であることから、地下水の浸潤にともなって膨潤する。これによって緩衝材の一部が処分坑道や処分孔からはらみ出して、その密度が低下することが懸念されるため、処分坑道の膨出に対する対策として、コンクリートプラグを坑道に設置すること、処分孔の膨出に対しては、処分孔の上にキャップとなる上蓋を設置し、これをアンカーボルトで固定する方法、天盤支持方式として鋼材を組み合わせる方法が提案された。

## 2) NUMO セーフティケースにおける緩衝材の施工要件

施工関係については、パイピング・エロージョンに関する規定として、以下の内容が示されている。

### a 許容できる緩衝材流出量（NUMO セーフティケース 参考資料 許容できる緩衝材の流出量の設定 P4-83）

緩衝材の累積流出量については、最大膨潤率 / 隙間堆積比 > 2 という設定と緩衝材の累積流出量[Mg]の関係から 2.2Mg が与えられ、平均乾燥密度 [Mg/m<sup>3</sup>] > 1.0 と緩衝材の累積流出量[Mg]の関係から 1.3Mg が与えられ、小さい値である 1.3Mg を緩衝材の許容流出量とした。これは緩衝材の局所的な流出が発生しても、緩衝材の安全機能を確保し、局所的な緩衝材領域での隙間の発生、密度の低下の影響について評価したものである。

### b 許容湧水量の基準値（NUMO セーフティケース 参考資料 許容湧水量の基準値の設定 P4-84）

3 つの岩種、深成岩、新第三紀堆積岩、先新第三紀堆積岩に従って許容湧水量[L/min]の基準値が決定された。許容流出量に対する湧水量を、緩衝材の流出量と湧水の総流量の関係式から求め、湧水量の基準値を設定した。湧水量は、次式で表される。

$$\text{湧水量[L/min]} = \text{湧水の総流量[L]} / \text{評価期間[min]}$$

ここで、評価期間は、処分坑道に対して一本目の処分孔に廃棄体を定着してから、その上の処分坑道を埋め戻すまでの期間を示す。

深成岩 = 2.8[L/min]、新第三紀堆積岩 = 3.0[L/min]、先新第三紀堆積岩 = 1.7[L/min]が基準値として決定された。

### c 許容湧水量（緩衝材の滴水対策の観点から）（NUMO セーフティケース 参考資料 許容湧水量の基準値の設定 P4-85）

許容湧水量は、貯留量 ( $V = d \times \pi \times (R/2)^2 \times \varepsilon / 100$ ) を施工時間 (t) で除することで

設定した。この時、Vは処分孔下の貯留層の体積である。

処分孔直径(R)=2.22m、湧水貯留層高さ=0.3m、湧水貯留槽の空隙率=26%(最密六方構造を仮定)、人工バリアの定置に必要な時間(t)=480分の場合、許容湧水量は、Vをtで除すことにより、 $6.3 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{min}$  (0.63L/min)と設定された。

d 処分孔利用率 (NUMO セーフティケース 参考資料 EDF の評価: 処分孔利用率の算定 P.4-44)

深成岩、新第三紀堆積岩、先新第三紀堆積岩について、処分坑 20 孔×亀裂を統計的に 100 回発生させた場 (延べ 2,000 本分の処分孔) に対して、処分孔に流れ込む湧水量を評価し、その結果と上記 2)、3)の許容湧水量から処分孔の利用率を算定している。

深成岩では利用率 76.2%、先新第三紀堆積岩では利用率 92.1%、新第三紀堆積岩では利用率 100%となった。

2)、3)の施工要件について、緩衝材施工 (滴水対策) の成立条件の方が、パイピング防止の条件よりも厳しくなり、割れ目頻度の高い深成岩モデル、先新第三紀堆積岩では、湧水量が多い処分孔が多く、利用率は低下することになる。一方、新第三紀堆積岩では割れ目頻度が低いため、基質の多孔質部からの湧水を入れても、湧水量は低くすべての処分孔が利用可能である。

(3) 確認 (モニタリング) 関係

モニタリングについては、特に言及されていないが、擾乱される前のベースラインモニタリングを実施し、建設期間、操業期間ともに継続して、地下環境、地上環境の計測データに変化がないかどうかを監視するモニタリングが行われるものとする。

7.3.6 スウェーデンにおける緩衝材の仕様、施工に関する知見の概要

前項の考え方に基づいてスウェーデンにおける緩衝材の仕様、施工に関する知見を整理すると、以下ようになる。

(1) 設計関係

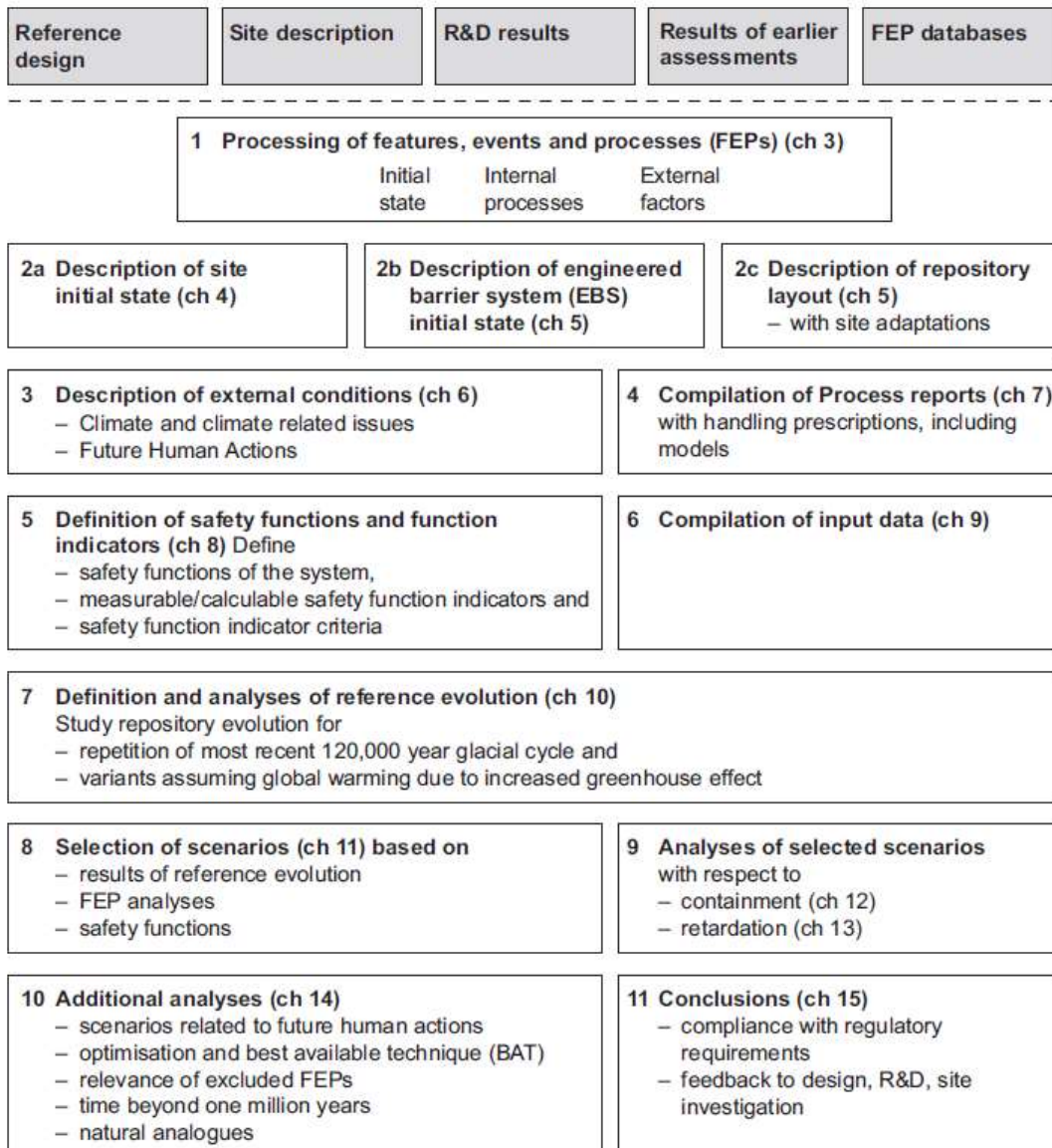
1) 設計について

SKB の処分施設の設計は、SR-Site のメイン報告書に述べられている。これはスウェーデンにおいて使用済燃料の最終処分場である Forsmark に KBS-3 のコンセプトに従って貯蔵する際の長期安全性を評価する報告書であり、TR-11-01 (Technical Report) に Volume I、II、IIIとしてまとめられている。これらは、SKB が規制側である SSM に提出した許認可申請をサポートする報告書である。

この報告書は、Step1 の FEP プロセスから Step11 の結論に至るまで、以下の流れに従っ

て、報告されている。図 7.3.6-1 に安全性評価における主要な 11 のステップを示す。

- Step 1 FEP プロセス
- Step 2a 初期状態の記述
- Step 2b EBS の初期状態の記述
- Step 2c 処分場のレイアウトの記述
- Step 3 外部状況（天候、天候に関連する事象、将来の人為的行動）
- Step 4 プロセスの記述
- Step 5 安全機能(Safety function)、安全機能指標(Safety function indicators)および安全機能指標基準（Safety function indicator criteria）の記述
- Step 6 データの集積
- Step 7 対象とする変化の解析(Analysis of reference evolution)
- Step 8 シナリオの選択
- Step 9 選択したシナリオに関する解析
- Step10 追加解析等
- Step11 結論



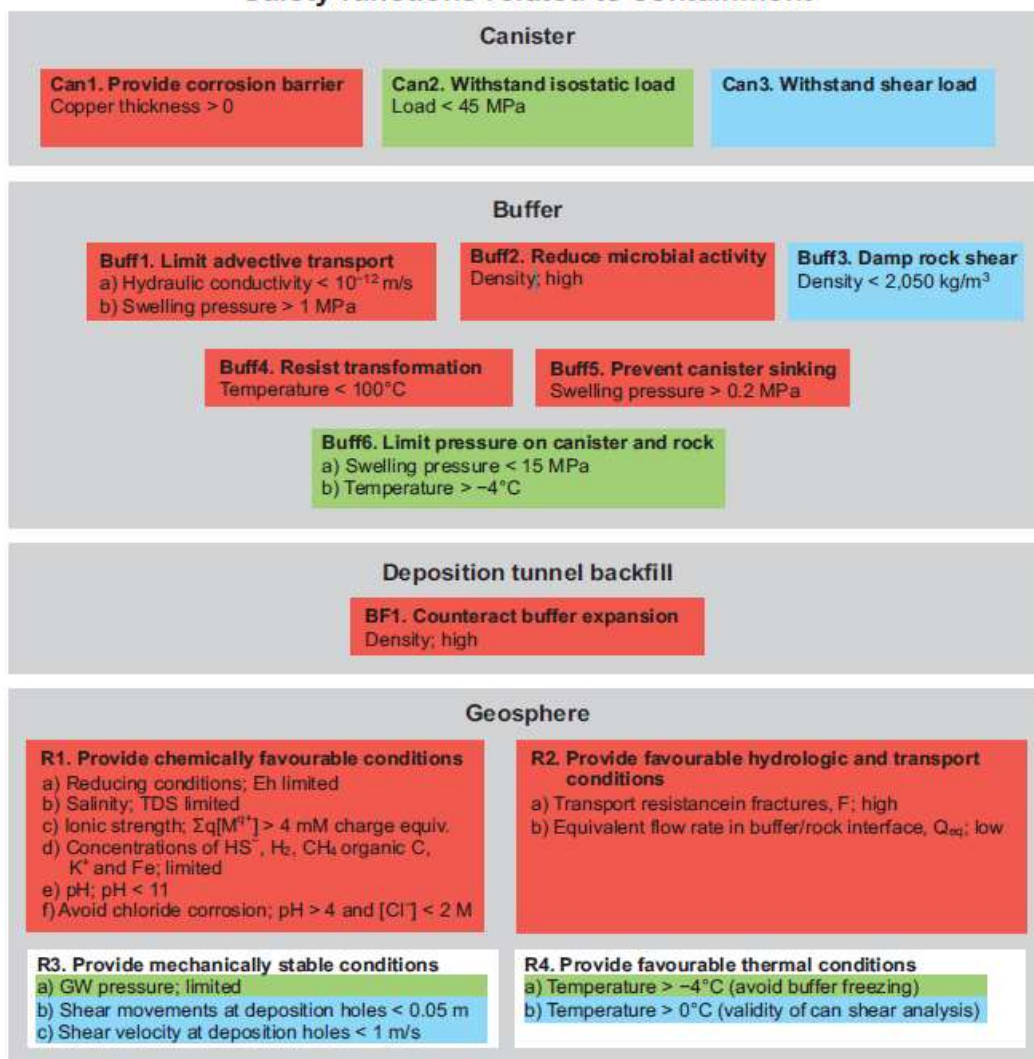
(点線の上の部分は、評価のインプットデータである。メインレポートの各章を(ch 〇〇)で示す。)

図 7.3.6-1 安全性評価における主要な 11 のステップ

## 2) 安全機能について

処分場の多重バリアを構成するキャニスター、緩衝材、埋め戻し材、地質環境の安全機能を図 7.3.6-2 に示す。

## Safety functions related to containment



注) Can 1、Buff 1、Bf 1、R 1 と表示しているのはそれぞれのバリアの FEP 番号であり、基準となる具体の数値は表示せず、“高い”、“低い”、“限定的”と表示している。色彩の赤 (Can1)、緑 (Can2)、青 (Can3) は、キャニスターのそれぞれの3つの安全性に関するものとして表している。

図 7.3.6-2 処分場の多重バリアを構成するキャニスター、緩衝材、埋め戻し材、地質環境の安全機能

### 3) SR-Site 報告書のヒエラルキーについて

SKB のメイン報告書に関連する主な報告書として、FEP 報告書、6つの製作報告書、燃料とキャニスターのプロセス報告書、緩衝材・埋戻し材・閉鎖に関するプロセス報告書、地層に関するプロセス報告書、気候報告書、生物学的環境に関する報告書、データ報告書、FHA 報告書、放射性核種の移動報告書、その他がある。図 7.3.6-3 に SR-Site 報告書のヒエラルキーを示す。

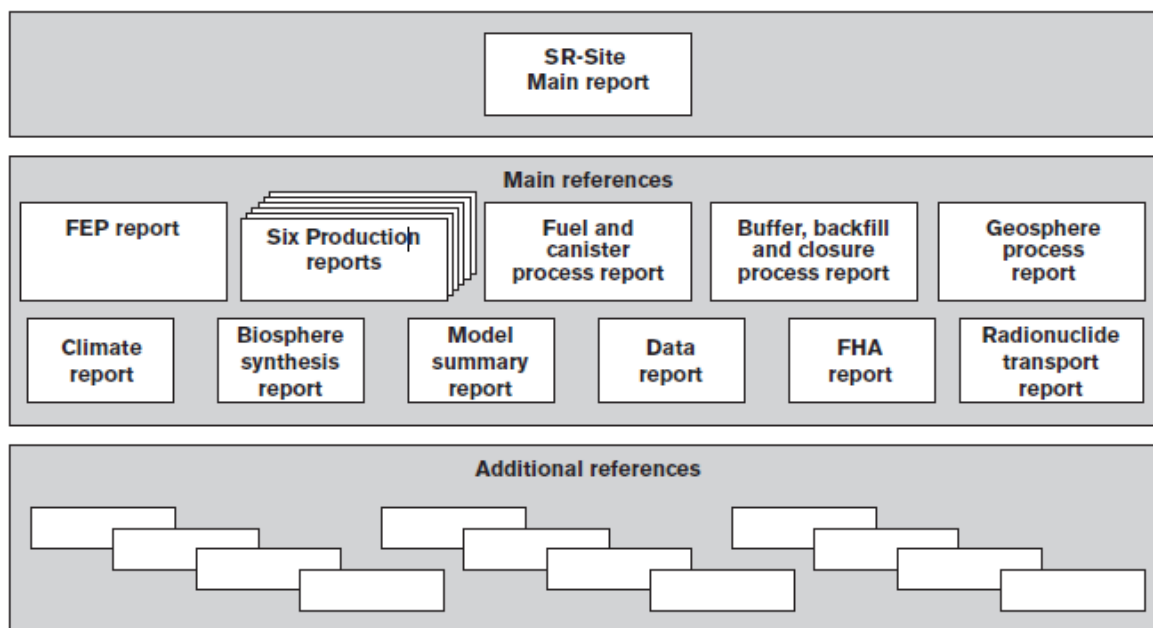


図 7.3.6-3 SR-Site のメイン報告書とそのヒエラルキー

#### 4) 緩衝材に関するプロダクション報告書

6つのプロダクション報告書のうち、緩衝材・埋戻し材・閉鎖に関するプロセス報告書としてTR-10-47があり、このうち緩衝材に関する記述を以下に示す。

##### ① 緩衝材の初期状態

緩衝材の初期状態（定置時の状態）について以下に概説する。より正式で詳細な説明は、緩衝材製造報告書（SKB 2010d）に記載されている。緩衝材の説明には、指定された変数のセットが使用される（表 7.3.6-2 参照）。

処分孔では、銅製キャニスタを粘土の緩衝材で取り囲む。緩衝材は、ベントナイトのブロックおよびリングとして設置される。ブロックはキャニスタの上と下、ベントナイトリングはキャニスタのまわりで使われる。

SR-Site の目的上、2つの異なるタイプのベントナイトが基本的な緩衝材の素材とみなされている。1つは American Colloid Company 社の供給する Wyoming タイプ（MX-80）の天然 Na 型ベントナイトであり、もう1つは Silver and Baryte 社の供給するギリシャ・ミロス島産の天然 Ca 型ベントナイト、IBECO RWC（Calziumbentonit IBECO DEPONIT CA-N とも呼ばれる）である（非転換ミロス・ベントナイト）。これらのベントナイトは主にスメクタイト・ミネラル・モンモリロナイト（約 85%）で構成されており、無拘束の状態では水に接触すると膨張するという特徴がある。モンモリロナイト含有量の変化は数パーセント内にな

ると予測されている。実際の処分場では、適切な緩衝材の材料として多くの選択肢がある可能性がある。

MX-80にはスメクタイトの他にも副成分が含まれている。アルバイト、石英、クリストバライト、白雲母、セッコウなどである。また、微量の黄鉄鉱、方解石、菱鉄鉱、重晶石、水酸化鉄も含まれている（表 7.3.6-1 を参照）。ICP/AES の解析によると、酸化物で示される MX-80 の平均的な化学的組成は、SiO<sub>2</sub> 57%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 18.5%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3.6%、MgO 2.3%、CaO 1.3%、Na<sub>2</sub>O 2.0%、K<sub>2</sub>O 0.5%、TiO<sub>2</sub> 0.2%、全炭素 0.3%、全硫黄 0.3%、強熱減量 13.7%である。

ミロス・ベントナイトのスメクタイト以外の鉱物は主に方解石、ドロマイト、石英、クリストバライトである（表 7.3.6-1 を参照）。ICP/AES の解析によると、酸化物で示される平均的な化学的組成は、SiO<sub>2</sub> 48%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 15.7%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 4.56%、MgO 2.92%、CaO 5.4%、Na<sub>2</sub>O 0.7%、K<sub>2</sub>O 0.8%、TiO<sub>2</sub> 0.7%、全炭素 1.0%、全硫黄 0.7%、強熱減量 20%である。

ベントナイトのブロックとリングの製造方法は主に単軸成形と静水圧プレス成形の 2 種類である。ここでは、すべてのブロックが単軸成形で製造されるものと仮定する。

表 7.3.6-1 MX-80およびDeponit CA-Nベントナイトの組成(不純物および随伴鉱物を含む)  
(Karnland et al. 2006)

成分	MX-80 (重量%)	Deponit-CaN (重量%)	±
アルバイト	3	0	1
アノソクレーズ	0	2	1
方解石+菱鉄鉱	0	10	1
クリストバライト	2	1	0.5
ドロマイト	0	3	1
セッコウ+硬セッコウ	0.7	1.8	0.2
雲母	4	0	1
モンモリロナイト	87	81	3
黄鉄鉱	0.07	0.5	0.05
石英	3	1	0.5
CEC (meq/100 g)	75	70	2
Na <sup>+</sup>	72%	24%	5%
Ca <sup>2+</sup>	18%	46%	5%
Mg <sup>2+</sup>	8%	29%	5%
K <sup>+</sup>	2%	2%	1%

バルクで購入され船で運搬されたベントナイトは、船に積載される前と荷受時に品質管理が行われる。これは、品質が仕様範囲内であり、輸送中に汚染がなかったことを確認するために行われる。品質管理はブロックとリングの製造中にも実施される。成形前に含水量をチェックすることが重要で、これにより製造プロセスで含水量を調節して適正化できる。



ベントナイトのブロックとリングの製造およびその後の定置プロセスにおける主な目標は、据付後に均衡化を行った後、湿った緩衝材であらかじめ定義されている最終的な密度を達成することである。現在定義されている飽和緩衝材に必要な密度範囲は  $1,950\sim 2,050\text{ kg/m}^3$  である。かさ密度は、キャニスタと緩衝材、および緩衝材と岩の間に生じた隙間に応じて異なる。隙間は、ブロックの設置に必要なスペースによって決まる。緩衝材製造報告書(SKB 2010d)によると、キャニスタのチューブと緩衝材の隙間は幅  $10\text{ mm}$  で、緩衝材と岩の間の周囲境界沿いの隙間は  $50\text{ mm}$  である。隙間にはベントナイトのペレットが詰められる。

各坑道の処分孔における緩衝材の定置は、処分孔を掘削してから数ヵ月後に行われることがある。処分孔は、掘削と緩衝材の定置の間の期間に水で満たされていたものと推定される。このため、処分孔を準備する際は排水が最初のステップとなる。緩衝材は、特別に設計された緩衝材充填車両によって設置される。その後、緩衝材の設置を確認し、必要に応じて調節する。

銅製キャニスタの設置は、特別に設計された定置機械を使って行われる。最上部のベントナイト・ブロックは、緩衝材設置装置でキャニスタを据え付けた直後に設置される。最終的な取り扱い手順および緩衝材設置装置と定置機械の最終的な設計はまだ決定されていないが、この一般的な作業手順の説明には影響しない。処分孔の幾何公差が小さければ、緩衝材とキャニスタの定置エラーのリスクも小さい。

緩衝材は、坑道が埋め戻されるまで水や高い湿度から保護する必要がある。キャニスタの定置前、坑道の埋め戻しによって緩衝材にカウンターウェイトがかかる前に、緩衝材が膨潤し始める可能性があるためである。1つの方法として、処分孔に排水チューブを挿入し、ゴム製の仮保護シートで緩衝材全体を保護することが可能である。保護シートは、坑道の埋め戻しが始まるまで密封される。ゴム製仮保護シートと排水チューブは使用後に除去される。

## ② 緩衝材変数の定義

EBS 初期状態の各構成要素は、特定の物理的な変数のセットによって説明される。これは、安全評価の該当する構成要素の長期的な変遷を十分説明できるよう選択される。

緩衝材は、内側ではキャニスタとの界面、外側では処分孔の岩の表面との界面、底部ではボアホールの底にあるコンクリートプレート最上部の銅製プレートとの界面、最上部では埋め戻し材との界面により固定される。

緩衝材は温度分布によって熱的に特徴付けられ、放射能については、放射能が暴露される放射線場の強度（主に $\gamma$ 線および中性子線）によって特徴付けられる。

水力学的には、緩衝材は含水量、そして時にはガス含有量（脱飽和）、流体変数（圧力と流量）によって特徴付けられる。これらは主に緩衝材が水で飽和される際、一時的に重要になる。

緩衝材は力学的には応力状態で特徴付けられる。

緩衝材の化学的状態は鉱物学的に定義される（モンモリロナイトの組成、他の粘土鉱物、その他の不純物など）。化学的状態は、間隙水の組成および処分孔の構造材料と残置物（stray materials）の有無によっても定義される。

変数は表 7.3.6-2 で定義されている。一部の変数の値は、異なる相の密度に応じて変わる。使用される値は、水の密度（pw）が 1,000 kg/m<sup>3</sup>、粘土固体の密度（pcs）が 2,780 kg/m<sup>3</sup> である。

変数の初期値（処分時の値）は、緩衝材製造報告書（SKB 2010d）に記載されている。

### ③ 緩衝材の性能と安全性

安全評価で緩衝材の性能を評価するため、数多くの性能指標が、時間の経過に伴い満たすべき基準とともに策定されている。詳細については、SR-Site メインレポート（SKB 2011）を参照すること。基準は表 7.3.6-3 に要約されており、本報告書で当該基準が説明されているセクションが参照されている。基準の一部は直接、緩衝材の特性（温度など）に関連しない。

緩衝材に含まれているキャニスタを腐食する物質の含有量は少なくなくてはならない。回避できない初期の酸素量は別として、黄鉄鉱の含有量は長期的な問題となる。最初から存在していた酸素または侵入酸素によって酸化されていない黄鉄鉱は、キャニスタを腐食する硫化物を放出する。ただし、この量に関する絶対的な基準はない。

表 7.3.6-2 緩衝材変数の定義

変数	定義
緩衝材の形状	緩衝材の幾何学的な寸法。界面の説明など（内側はキャニスタ、外側は地圏）
間隙の形状	時間的・空間的関数としての緩衝材における間隙の形状。総間隙率（固体に占められていない体積分率）が示されることが多い
放射線強度	緩衝材における時間的・空間的関数としての（ $\alpha$ 線、 $\beta$ 線） $\gamma$ 線、および中性子線の強度
温度	緩衝材における時間的・空間的関数としての温度
含水量	緩衝材における時間的・空間的関数としての含水量
ガス含有量	緩衝材における時間的・空間的関数としてのガス含有量（放射性核種を含む）
流体変数（圧力および流量）	緩衝材における時間的・空間的関数としての水およびガスの流量と圧力
ストレス状態	緩衝材における時間的・空間的関数としてのストレス状態
ベントナイト組成	緩衝材中（放射性核種を含む）のベントナイト及び不純物質の経時的、空間的変化を含めた化学的組成
モンモリロナイト組成	モンモリロナイトの平均的な分子構造（電荷補償陽イオンを含む）
間隙水組成	緩衝材の時間と空間における間隙水（放射性核種および溶解ガスを含む）の組成
構造材料および残置物 (stray materials)	緩衝材に誤って残された残置物 (stray materials) の化学的組成と量。この段階では、この成分について構造材料は定義されていない

表 7.3.6-3 緩衝材性能指標、基準、根拠の要約

性能指標	基準	根拠	参照
バルク透水係数	$K^{\text{緩衝材}} < 10^{-12} \text{ m/s}$	質量移行を拡散優勢プロセスに制限	3.3.2
膨潤圧力	$> 1 \text{ MPa}$	締め具合、自己シーリングを確認	3.4.1
最高温度 <sup>1</sup>	$T^{\text{緩衝材}} < 100^{\circ}\text{C}$	緩衝材の長期的に好ましい特性を維持	3.5.9
最低温度	$T^{\text{緩衝材}} > -4^{\circ}\text{C}$	凍結を防ぐ	3.2.2
キャニスタ全体周囲の膨潤圧力	$> 0.2 \text{ MPa}$	キャニスタの沈下を防ぐ（基準は後ほど決定）	3.4.1
キャニスタ全体周囲の緩衝材飽和密度	$> 1,800 \text{ kg/m}^3$	微生物活動を低減	3.5.14
キャニスタ全体周囲の緩衝材飽和密度	$> 1,650 \text{ kg/m}^3$	緩衝材のコロイド移行を防ぐ	3.5.4
キャニスタ全体周囲の緩衝材密度	$< 2,050 \text{ kg/m}^3$	岩のせん断からキャニスタを保護	3.4.1

地下水組成のいくつかの特徴は、処分場の化学的に好ましい状態を提供する上で不可欠で

ある。これについては地圏プロセス報告書（SKB 2010i）で説明されているが、その一部は緩衝材の性能に直接関係している。

地下水の塩分は高すぎたり低すぎたりしてはならない。緩衝材と埋め戻し材からのコロイド放出を避けるため、陽イオンの合計電荷濃度は 4 mM を超えなくてはならないので、 $\Sigma q[M^+]_{GW} > 4 \text{ mM}$  となる。高イオン強度の地下水は、緩衝材の特性に悪影響を与える。一般的に、100 g/L 程度の NaCl 濃度（1.7 M NaCl）に対応するイオン強度は緩衝材では許容できるが、特定の基準はない。

pH については、緩衝材および埋め戻し材の安定性の観点から  $\text{pH} < 11$  という基準を策定できる。これは、スウェーデンのどの天然地下水でも可能である。ただし、処分場の建設材料および残置物（stray materials）（特にコンクリート）が地下水を汚染して pH 値が高くなる可能性がある。

#### ④ SR-Site における緩衝材プロセスの取り扱いの要約

表 7.3.6-4 は、SR-Site 安全評価における緩衝材プロセスの取り扱いを要約したものである。この表では、プロセスは定量化が行われるモデルに「マッピング」されているか、取り扱い方法の簡単な口頭説明が提供されている。不飽和状態および温度上昇という特徴のある初期変遷は多くの点で長期的な飽和期間とは異なるため、表の説明はこれに応じて分けられている。

表 7.3.6-4 の情報は以下のようにまとめることができる。初期飽和フェーズでは、緩衝材の飽和中にキャニスタおよび緩衝材のピーク温度と THM 変遷を定量化する必要がある。ニアフィールド変遷モデルを使用してニアフィールド全体の熱的変遷のモデリングが行われ、キャニスタと緩衝材のピーク温度が評価される。基岩における異なる水力学的状態の水力学的変遷を明確に説明するため、緩衝材の THM 連成モデリングが行われる。飽和フェーズ終了時の膨潤については、システムモデルと THM モデルの双方で対応される。システムモデルは、入力データの多数の組み合わせに対して膨潤の最終的な結果を迅速に評価する場合に使用することができる（塩水の侵入による浸透効果を含む）。

緩衝材の温度が上昇および変化する熱的フェーズの化学的変遷については、化学モデルで説明する。

その他のほとんどのプロセスは熱的不飽和状態の影響を有意なレベルで受けないため、早期飽和・熱的フェーズでは無視される。この典型的な例は「凍結」プロセス（次頁の表の Bu3）である。

表 7.3.6-4 異なる時間枠および特殊な地震のケースに対する緩衝材プロセスの取り扱い方法を説明する緩衝材のプロセス表

	再飽和/「高温」期間	飽和および「高温」期間後の長期	地震	注
<b>損傷のないキャニスタ</b>				
Bu1 放射線減衰/熱生成	線量率が低すぎて緩衝材にとって重要性がないため無視	線量率が低すぎて緩衝材にとって重要性がないため無視	関連なし	
Bu2 熱移行	システムモデル	システムモデル	関連なし	
Bu3 凍結	永久凍土条件が必要なため無視	緩衝材の温度が $-4^{\circ}\text{C}$ を超える場合は無視。その他の場合はバウンディング結果の計算	関連なし	長期的な処分場の温度は永久凍土層深度のモデリングにより取得
Bu4 不飽和状態での水吸収および水移行	THM モデル	定義的には関連なし	関連なし	
Bu5 飽和状態での水移行	不飽和状態では無視。飽和状態では、「長期」の場合と同じ処理	透水係数が $10^{-12} \text{ m/s}$ 未満の場合は拡散が優勢になるため無視	圧力の一時的変動を考慮	透水係数が高い場合の緩衝材の結果を評価する。2つの異なるケースが研究されている。緩衝材が伝導性の高い多孔性媒体として機能している場合（質量損失） 緩衝材が破損した場合（修正）
Bu6 ガス移行・溶解	完全溶解	（スルー溶解） ガス相が存在すると想定されていない	（スルー溶解） ガス相が存在すると想定されていない	
Bu7 パイピング・エロージョン	モデル研究	関連なし。Bu18も参照	関連なし	緩衝材質量の損失が計算される
Bu8 膨潤・質量の再配分	緩衝材・埋め戻し材の相互作用と熱膨張を含む THM モデリングシステムモデル（最終膨潤）	エロージョン、収束、腐食生成物、クリープ、イオン交換および塩分による膨潤圧力の変化、キャニスタの沈下の統合的な評価	緩衝材・キャニスタ・岩の統合的な評価の一部	最初に設置された緩衝材の量の偏差も考慮する必要がある
Bu9 液状化	不飽和材料では関連なし	高い有効応力により高密度のペントナイトでは短パルスの液状化は発生しないため、無視	高い有効応力により高密度のペントナイトでは短パルスの液状化は発生しないため、無視	
Bu10 核種移流移行	飽和中に溶解した種の質量移行を簡素化した想定	透水係数が $10^{-12} \text{ m/s}$ 未満の場合は無視	圧力の一時的な変動を考慮	「飽和状態での水移行」を参照
Bu11 種の拡散移行	化学的モデル（熱的飽和フェーズ。不飽和フェーズは無視）	化学的モデル	変更された形状を考慮（拡散経路）	様々な地下水の組成を考慮 初期温度勾配を考慮
Bu12 収着（イオン交換を含む）	化学的モデル（熱的飽和フェーズ。不飽和フェーズは無視）	化学的モデル	特に取り扱わない	
Bu13 不純物の変化	化学的モデル（熱的飽和フェーズ。不飽和フェーズは無視）	化学的モデル	特に取り扱わない	
Bu14 水性スペシエーションおよび反応	化学的モデル（熱的飽和フェーズ。不飽和フェーズは無視）	化学的モデル	特に取り扱わない	
Bu15 浸透	実験データとの比較による評価	実験データとの比較による評価	特に取り扱わない	塩水の長期的な浸入の取り扱い
Bu16 モンモリロナイトの変質	モデル計算（熱的飽和フェーズ。不飽和フェーズは無視）	自然界からの証拠に基づく推計	緩衝材・キャニスタ・岩の統合評価の一部	
Bu17 鉄-ペントナイトの相互作用	鉄がペントナイトに接触することはないため無視	キャニスタが破損した場合にのみ考慮。緩衝材の効率が失われる可能性	キャニスタが破損した場合にのみ考慮。緩衝材の効率が失われる可能性	
Bu18 モンモリロナイトのコロイド放出	陽イオンの合計電荷が $4 \text{ mM}$ を超える場合は無視。その他の場合はモデリング	陽イオンの合計電荷が $4 \text{ mM}$ を超える場合は無視。その他の場合はモデリング	特に取り扱わない	緩衝材質量の損失を計算 飽和状態での水移行も参照
Bu19 放射線に起因する変質	キャニスタ外側の線量率が低すぎて効果がないため無視	キャニスタ外側の線量率が低すぎて効果がないため無視	キャニスタ外側の線量率が低すぎて効果がないため無視	
Bu20 間隙水の放射線分解	キャニスタ外側の線量率が低すぎて効果がないため無視	キャニスタ外側の線量率が低すぎて効果がないため無視	キャニスタ外側の線量率が低すぎて効果がないため無視	
Bu21 微生物プロセス	水性反応の程度は限定的なため、不飽和状態では無視。飽和状態では、「長期」と同じ処理	地下水における微生物栄養素の供給によって限定される硫酸塩還元の量的推計	特に取り扱わない	
Bu22 セメンテーション	プロセス Bu16「モンモリロナイトの変質」とともに検討	プロセス Bu16「モンモリロナイトの変質」とともに検討	緩衝材・キャニスタ・岩の統合評価の一部	
<b>破損したキャニスタ</b>				
Bu6 破損したキャニスタ：ガス移行・溶解	実験データに基づく量的推計（この期間中に破損は予測されていない）	実験データに基づく量的推計	実験データに基づく量的推計	
Bu19 破損したキャニスタ：放射線誘発変化	キャニスタ外側の線量率が低すぎて効果がないため無視	破損したキャニスタの核種からの $\alpha$ 線の効果を推計する。	破損したキャニスタの核種からの $\alpha$ 線の効果を推計する。	核種からの $\alpha$ 線の効果をセクション 2.5.11 で推計する。ここでは、計算結果を無視できるという結論に達した
Bu23 コロイド移行	飽和時の密度が $1,650 \text{ kg/m}^3$ 超の場合は無視。その他の場合はバウンディング計算を行う（この期間中に破損は予測されていない）	飽和時の密度が $1,650 \text{ kg/m}^3$ 超の場合は無視。その他の場合はバウンディング計算を行う	飽和時の密度が $1,650 \text{ kg/m}^3$ 超の場合は無視。その他の場合はバウンディング計算を行う	
Bu24 放射性核種のスペシエーション	この期間中に破損は予測されていない	実験データに基づく想定	実験データに基づく想定	
Bu25 水相における放射性核種の移行	この期間中に破損は予測されていない	COMP23（核種移行解析コード）	COP23（核種移行解析コード） 拡散経路の減少	
B26 ガス相における放射性核種の移行	この期間中に破損は予測されていない	量的推計	量的推計	

緑色のフィールドは、該当する期間では無視されるか関連のないプロセスを示す。赤色のフィールドは、安全評価におけるモデリングによって定量化されるプロセスを示す。オレンジ色のフィールドは、指定された条件によって無視されるプロセスを示す。白色のフィールド（地震の列）は、作者がプロセスの有意性を判定できなかったプロセスを示す。

熱条件が有意に変化した後の長期的な化学的変遷については化学モデルとシステムモデルの双方で対応し、気候変動などの結果として予測される様々な境界条件が対象となる。化学モデルは空間分解された結果を提供し、より多くの化学反応が含まれている。一方、システムモデルは数多くの入力データの組み合わせに対する迅速な評価で使用できる。モンモリロナイトの変質は別のモデリングで取り扱う。氷河期の希薄な地下水の浸入を原因とするエロージョンは、水地球化学解析によって特定の基準を下回るイオン強度が除外されないことが示された場合には取り扱う必要がある。これに応じてコロイド放出をモデリングしなくてはならない。

経験的關係を使用して、主要な特性（膨潤圧力や透水係数など）に対する化学的変遷の影響が評価される。緩衝材の質量再分配に関する多数の問題を長期的な変遷について評価する必要がある。

キャニスタが破損した場合、腐食している鑄鉄キャニスタインサートからのガス放出は、ベントナイト中のガス移行の実験的研究に基づいた量的推計によって処理される。緩衝材中の放射性核種の拡散は、放射性核種のスペシエーションを考慮して計算される。これは、拡散および収着データの選択に必要であり、実験データに基づいて推計される。緩衝材の密度が指定値を超える場合はベントナイト中の核種のコロイド (fuel colloids) の移行は無視される。その他の場合は、バウンディング計算ケースによって潜在的な線量結果に対するこのプロセスの影響が推計される。

## (2) 施工関係

SKB が使用する緩衝材について、設計で示す要件は、設計関係の表 7.3.6-3 緩衝材性能指標、基準に示す各値である。緩衝材の成分について日本と異なる点は、処分孔及び坑道に用いる緩衝材は緩衝材ブロック、ペレットとも 100%のベントナイトであり、ケイ砂や、碎石との混合はいっさい行っていない点である。

SKB が処分場の操業の際に問題としている課題は、発生する地下水の処理方法であり、その対処方法とコンセプトが 2014 年の「埋戻し材のシステムデザイン」R-14-09 を境にして大きく変化している。2010 年では、①1 処分孔当たり最大 0.1L/min の地下水の流入とする。②坑道長さ 300m 当たり 5L/min の湧水は許容される。③埋戻し速度は、処分坑道が完成するまで 6m/日の速度でなければならない。つまり、1 処分孔当たりの湧水量が 0.1L/min であった場合は、その処分孔は使用せず埋め戻すという方針であったが、2014 年以降は、いかなる処分孔も利用しなくてはならないという考え方と、排水処理を行うことによって、処分孔、および坑道の地下水を排水するというコンセプトに変わった。

これに伴って、坑道に用いるペレットは、坑道 6m 当たり 16m<sup>3</sup>の地下水を蓄えることができるという考え方が取り入れられた。

新たな対策として、地下水の湧水がある場所に、①処分孔岩盤とペレット間に設置される導水材（ジオテキスタイル）を使い湧水を分散させること、②人為的な注水を行うこと、③ペレット

の部分に排水管を挿入して、排水を行うという3つの対策が示されている。地下水の工学的対策については、今回のSKBの報告書が最終だとは考えられないため、今後ともフォローしていく必要がある。

### (3) 確認（モニタリング）関係

SKBのモニタリングの特徴は、地下水のモニタリング（主に地下水圧、流量および化学的性質）がモニタリングプログラムの大部分を占めることである。モニタリングは最終処分場の建設中、また処分場が操業される限り継続されると予測される。モニタリングパラメータと対象事項を必要に応じて追加することと同様に重要なのが、不要になったモニタリング対象事項を削除することである。表7.3.6-5に計画中のモニタリングプログラムを紹介する。SKBではモニタリングとして特に、地下水モニタリングと地震モニタリングを重要と考えているため、これについて述べる。



表 7.3.6-5 計画中のモニタリングプログラムの範囲

モニタリング	測定	注釈
国の地震モニタリング	地震等の突然の自然な岩石の動き。ニアフィールドにおける爆破が引き起こす誘発的地震活動も記録される。	スウェーデン国立地震観測網（SNSN）のフレームワーク内で実施。これまでも数十年にわたり実施されており、2004年にフォルスマルク調査区域にモニタリングステーションが建設され、調査が補足された。
局所地震観測網	国立の観測網に記録されるものよりも小規模な突然の自然な誘発的岩石移動。小規模な地震の研究と、爆破が母岩内の局所的応力の再分布に及ぼす影響の解析に使用される。	モニタリングシステムは建設開始前に設定される。
GPSを用いた岩石移動の測定	母岩内の水平方向のクリープ運動。	GPSステーションの援助を受けて実施。測定は2005年以来フォルスマルクで実施されている。
気象学的モニタリング	気候のパラメータ - 降水量 - 大気温度 - 大気圧 - 風速 - 風向 - 相対的湿度 - 全放射 - 積雪深 - 雪の含水量 - 氷結/解氷時期	2003～2007年の間（すなわち、サイト調査期間の大半）、フォルスマルクの2つの気候観測所で、（雪と氷に関するパラメータに加え）気候のパラメータを記録した。その後も1つの観測所で継続された。2003年以来、雪の測定は調査区域内の3ヶ所、氷の測定は2ヶ所で実施されている。
水文学的モニタリング	表層水の水位（小川、湖、バルト海） 小川への水の流量。 表層水のEC（導電性）と温度。	サイト調査期間の大部分で実施された。
地下水のモニタリング（水位、圧力および流量）	土壌の井戸とボアホール内の地下水面。 パックオフされたボアホールセクション内の地下水の圧力。 パックオフされたボアホールセクションの地下水の流量。	モニタリングシステムはサイト調査中に徐々に拡大された。 地下水のモニタリングは、例えば、地下施設からのボアホールが追加され、より短期間、あるいは長期間モニターされる等、時と共に変化する。
施設への地下水の流入	例えば以下の各項と関係する地下水の流量と導電性： - ポイント浸水 - 坑道または坑道セクション内の浸水 - 処分孔への浸水 - 施設全体への浸水	モニタリングシステムは施設の建設が進むにつれて設置され、徐々に拡大された。処分坑道と処分孔は完成後から処分開始準備が完了するまでモニターされる。
水文地球化学的モニタリング	以下の各項における化学的パラメータと地表の生態学的パラメータ： - 降水量 - 表層水 - 土壌の井戸とボアホールからの地下水 - 施設への浸水	サイト調査中にモニタリングが開始され、徐々に拡大された。 水文地球化学的モニタリングは、例えば、地下施設からのボアホールが追加され、より短期間、あるいは長期間モニターされる等、時と共に変化する。 施設に浸潤した水はポイント浸水や排水装置からサンプリングすることができる。

## 1) 地下水のモニタリング

地下水のモニタリングでは、母岩内部の水理的連続性を反映する地下水の圧力変化を記録する。この種のモニタリングデータは水文学的、水文地質学および水文地球化学的モデルのさらなる開発の基盤となるほか、(含水変形領域の形状と特性を示す)地質学的モデリングにも寄与する。モニタリング結果は安全評価中の計算にも使用される。SKBのSFR、Clabおよびエスポ岩盤研究所での経験によれば、水理条件の変化には複数の、時に相互作用的な原因が存在する可能性がある。その一部は長期傾向(非可逆的)だが、他は非可逆的あるいは可逆的な突然の(また時に予想外の)変化かもしれない。地下での地下水のモニタリングは、エスポ岩盤研究所の建設中に実施されたモニタリングに類似していると予測される(Almén and Stenberg 2005)。モニタリングプログラムの範囲は、必要に応じて測定対象事項を追加、削除できるように定期的に見直される。

地下水のモニタリングは、サイト調査の初期に開始され、徐々に今日の範囲まで拡大される。その後、最終処分場の建設フェーズの開始までほぼそのままの形で継続される(SK B 2007)。地下水のモニタリングによって、地下水面の変化と、より深い位置での、外部からの影響によらない長年にわたる地下水圧および化学組成の自然変化の長年の記録を含む独自のデータベースが結果的に得られる。さらに、モニタリングプログラムには表層水のパラメータ(小川、湖、海の水位と流量)と気象学的パラメータが含まれる。さらに化学解析のため表層水と降水量をサンプリングしてきた。このベースラインによって最終処分場が周辺環境に及ぼす影響を実証し、追跡するための継続的モニタリングに必要な基盤が得られる。

建設フェーズ中、地下水のモニタリングは、主に地下で、長期間あるいは短期間に一時的に、あるいは継続的に、測定対象事項が追加され拡大される。ほとんどの新しいボアホールが今後地下開口部内に掘削されるため、長期間モニタリングが実施可能な新しいボアホールは比較的少ない。処分区域内では、処分坑道のパイロット孔を処分プロセス中の決定の基盤となる適切な情報を提供できるほど長期間モニターできるように、掘削プログラムを坑道の建設と調整する。

設計前提を検証するため、浸水する地下水の流量と化学組成のモニタリングは、全坑道、立坑、岩石洞窟の適切な部分で実施するよう計画されている。同様に、処分孔への水の流量も測定される。

## 2) 地震モニタリング

地震モニタリングもサイト調査フェーズの大部分で実施された。フォルスマルクの地域環境での地震事象はスウェーデン国立地震観測網のフレームワーク内で記録され、そのフレームワークは調査期間中フォルスマルクの観測所によって拡張された。この活動は最終処分場の建設と操業中も継続される。

地震モニタリングは、はるかに微弱な地震事象をも記録できる局所地震観測網により補完

される可能性がある。地震データベースの蓄積に加え、局所地震観測網の測定データによって、ニアフィールドにある岩石の坑道建設への反応をより深く理解することができ、それによって局所的な応力場の特性に関するより深い知見を導くことが可能である。局所地震観測網は、掘削作業が開始される1年程度前に実施される。

### 7.3.7 まとめ

JAEA や NUMO で取りまとめられた緩衝材の仕様等を決定する方法・要件やデータ整理の考え方・体系化方法を整理した。

NUMO セーフティケースでは、安全機能に係わる設計要件やそれらを満足する緩衝材の仕様範囲等が提示されている。この仕様範囲等を考える上での緩衝材のデータ整理の基軸は有効粘土密度が採用されており、緩衝材ブロックについては施工面（製作可能性）での制約も考慮されている。

ここで提示されている設計要件は、各々が必ずしも独立したものではなく、相互に影響を与え合うものであることに留意が必要に思われる。例えば、求められる自己シール性は製作施工性（隙間）に依存するものであり、また自己シール性は緩衝材の流出を抑制し、流出抑制は低透水性の担保に繋がるものである。同様に製作施工性（密度）、物理的緩衝性（変形）、自己修復性なども密度・厚さの変化という事象等を介して低透水性に影響を与える設計要件である。このような階層構造を精査し、より単純化した設計要件を整理していくことが重要と思われる。

また一方では、これらの設計要件に、2章で整理された知見にもある「膨潤後の密度差の残存」も含め、不飽和から飽和に至る期間に緩衝材の性能に与える要因（乾燥密度、流入量、地下水組成、緩衝材成分、隙間、浸潤速度等）に関しても設計要件に加味した方が良いように思われる。更には、例えば設計要件の一つとしている低透水性の指標は「ペクレ数」とされているが、SKB では「乾燥密度」とされており、より適切な指標を検討する必要があるように思われる。なお、NUMO セーフティケースは、今後公開される包括的技術報告書のドラフト概要、という位置づけであり、裏付けとなるデータ等は現段階では未公開のため、包括的技術報告書が公開された後に、改めて情報を整理する必要がある。

## 7.4 総合的評価のための検討と課題の整理

### 7.4.1 実施内容

緩衝材施工方法に関する考え方の整理（取りまとめ）における、知見やデータの構造や体系化の素案を構築する。その際、例えば緩衝材の仕様に関連する整理の視点<sup>\*1</sup>やデータ整理の基軸<sup>\*2</sup>などについて、前章までで得られた最新の知見等に基づき具体化する。

併せて、得られた構造や体系化の素案に基づく整理の有効性や適性に関する概略評価を行い、今後収集すべき知見やデータ等を整理する。

\*1：例えば、自己シール性、自己修復性、低透水性、微生物影響、コロイドろ過能、製作施工性な

ど

※2: 例えば、緩衝材の特性に係るデータ整理において、主にクニゲル V1 の有効粘土密度を基軸としたこれまで整理に代わるようなデータの整理方法など

知見やデータの構造や体系化の素案として、7.2.4 で調査した各公開報告書の成果を踏まえ、全体を統合したロジックツリーを構築し、整理する。

#### 7.4.2 実施手順

本検討は以下の手順で実施する。

- ▶ 前章の成果を用いて、全体を統合したロジックツリーを構築する。
- ▶ 概略評価を試み、主命題「要求性能を満足する緩衝材が構築できること」の現状の信頼度に関する検討を行い、より主命題の信頼性を上げるためには、先ずどの知見やデータから収集すべきかの提示を試みる。

#### 7.4.3 全体を統合したロジックツリーの構築

##### (1) ロジックツリーの構築

前項において構築した「主命題：A サイトにおいて要求性能を満足する緩衝材を構築することが可能である」のロジックツリーの主命題、命題、副命題までの構築状況（3 階層目まで）を図 7.4.3-1 に示す。

本章における総合評価での全体を統合したロジックツリーの構築は、この樹形図をさらに細分化し、具体的な証拠（試験結果や解析結果）まで展開することを試みる。具体的な証拠とはこれまでに収集した論文や公開報告書等（引用文献も含む）となる。

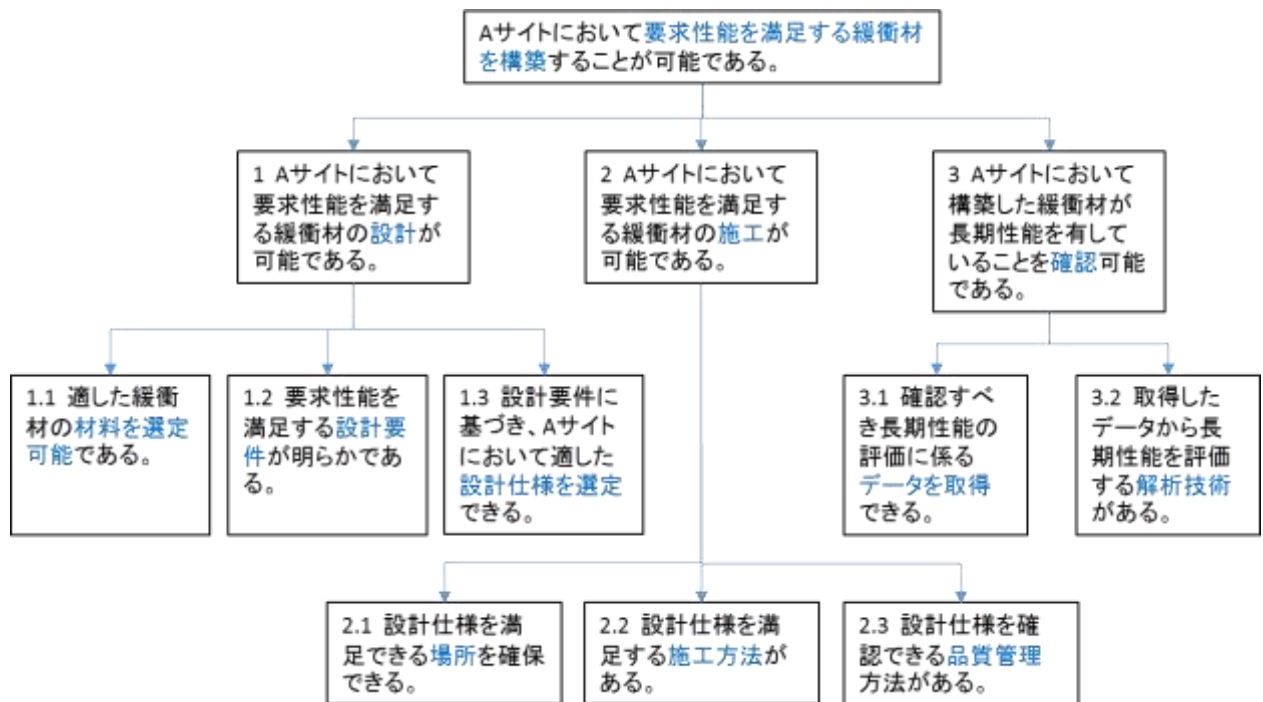


図 7.4.3-1 主命題に対するロジックツリー（3階層目まで、図 7.4.3-1 一部再掲）

■ 副命題：1.1 適した緩衝材の材料を選定可能である。

副命題“適した緩衝材の材料を選定可能である”ことを満足するためには、以下を満足する必要がある。

- ✓ 選定した材料が“要求を満足する性能を有している”ことが求められる。この副命題を評価するためには、様々な材料の中から要求を満足する性能を有する材料を選定する統一的な“評価指標（データ整理の基軸）の有無”が重要となる。
- ✓ 対象とする地層処分において使用する材料の量に対して、“十分な供給量を確保できる”ことが求められている。この副命題を評価するためには現段階で十分な供給量があることに加え、契約などにより、確実に使用できることが前提となる。
- ✓ 対象とする地層処分プロジェクトは積立金により予算を確保しているため、大きな意味での予算枠が確定している。そのため、“予算範囲内で購入できる”ことが前提となる。

これらを体系化する、つまりロジックツリーで表現すると、図 7.4.3-2 のようになる。

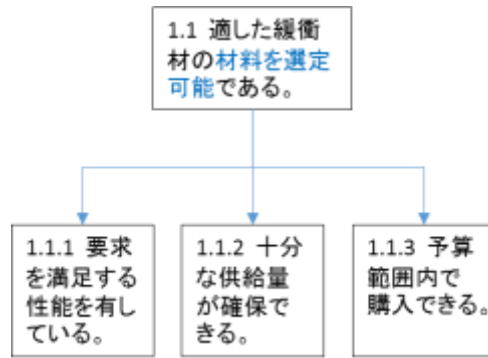


図 7.4.3-2 副命題：1.1 材料を選定可能のロジックツリー

■ 副命題：1.2 要求性能を満足する設計要件が明らかである。

副命題“要求性能を満足する設計要件が明らかである”ことを満足するためには、以下を満足する必要がある。

- ✓ “緩衝材が保有すべき機能 (safety functions) が明らかである”ことが求められる。この副命題を評価するためには、安全性を含め具体的な機能 (整理の視点) が提示されていることが重要となる。
- ✓ “緩衝材の機能を評価する指標 (function indicators) が明らかである”ことが求められる。この副命題を評価するためには各機能にて、具体的な指標が提示されていることが重要となる。
- ✓ “緩衝材の評価指標の判断基準 (function indicator criteria) が明らかである”ことが求められる。この副命題を評価するためには各評価指標にて、具体的な判断基準が提示されていることが重要となる。

これらを体系化する、つまりロジックツリーで表現すると、図 7.4.3-3 のようになる。

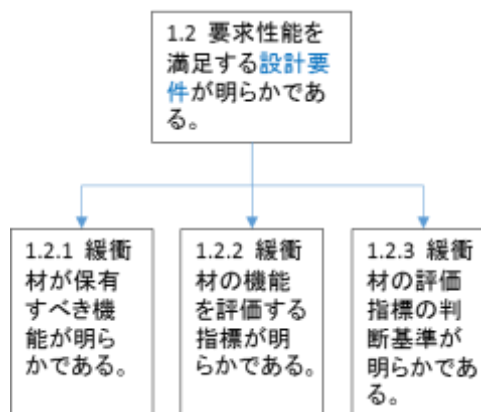


図 7.4.3-3 副命題：1.2 設計要件のロジックツリー

■ 副命題：1.3 設計要件に基づき、A サイトにおいて適した設計仕様を選定できる。

副命題“設計要件に基づき、A サイトにおいて適した設計仕様を選定できる”ことを満足するためには、以下を満足する必要がある。

- ✓ “設計要件を満足する仕様範囲が明らかである”ことが求められる。この副命題を評価するためには、具体的なデータによる仕様と機能の関係が明らかであることが重要となる。
- ✓ “緩衝材の制作・定置・施工などが実現可能である”ことが求められる。この副命題を評価するためには緩衝材の締固めなどに関連し、実現性があることが重要となる。
- ✓ “緩衝材施工後の長期健全性に大きな問題が無い”ことが求められる。この副命題を評価するためには主に力学的な観点での緩衝材の長期安定性の評価内容が明らかであることが重要となる。
- ✓ “サイトの特性が設計仕様と整合している”ことが求められる。この副命題を評価するためには例えば、サイトの地下水特性を考慮した緩衝材の仕様となっているかなどが重要となる。

これらを体系化する、つまりロジックツリーで表現すると、図 7.4.3-4 のようになる。

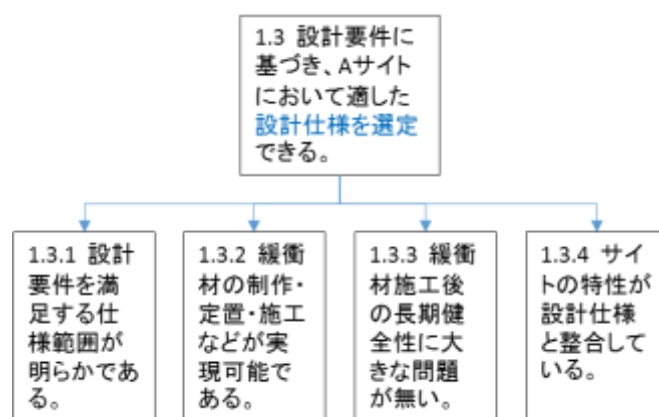


図 7.4.3-4 副命題：1.3 設計仕様を選定のロジックツリー

■ 副命題：2.1 設計仕様を満足できる場所を確保できる。

副命題“設計仕様を満足できる場所を確保できる”ことを満足するためには、以下を満足する必要がある。

- ✓ “緩衝材の施工に適した場所を確保できる”ことが求められる。この副命題を評価するためには、坑壁が安定している、湧水量が少ないことなどが要求となる。
- ✓ “緩衝材の施工に適した場所を工学的に確保できる”ことが求められる。この副命題を評価するためにはグラウトなどで湧水量を低減できることなどが要求される。
- ✓ “処分孔（坑道）からの排水方法が確立されている”ことが求められる。この副命題を評価するためには処分孔（坑道）からの具体的な排水方法が提示されていることが重要となる。

これらを体系化する、つまりロジックツリーで表現すると、図 7.4.3-5 のようになる。



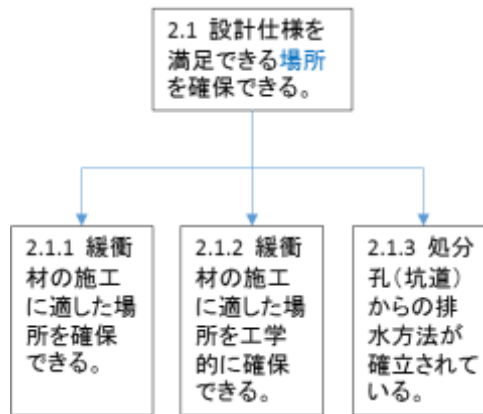


図 7.4.3-5 副命題：2.1 場所のロジックツリー

- 副命題：2.2 設計仕様を満足する施工方法がある。

副命題“設計仕様を満足できる場所を確保できる”ことを満足するためには、具体的に実証された遠隔・自動化された施工技術があることが必要となる。

- 副命題：2.3 設計仕様を確認できる品質管理方法がある。

副命題“設計仕様を確認できる品質管理方法がある”ことを満足するためには、以下を満足する必要がある。

- ✓ “適切な品質管理項目が明らかとなっている”ことが求められる。この副命題を評価するためには、使用材料の品質管理項目、原位置での品質管理項目が明らかになっている必要がある。
- ✓ “適切な品質管理技術が確立されている”ことが求められる。この副命題を評価するためには、使用材料の品質管理項目、原位置での品質管理項目を適切に測定できる技術が実証されている必要がある。

これらを体系化する、つまりロジックツリーで表現すると、図 7.4.3-6 のようになる。

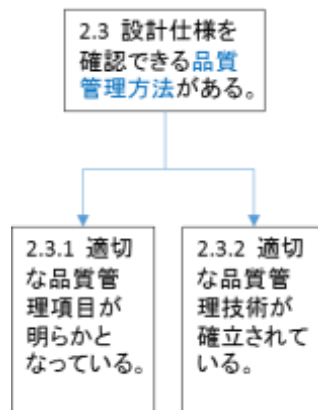


図 7.4.3-6 副命題：2-3 品質管理方法のロジックツリー

■ 副命題：3.1 確認すべき長期性能の評価に係るデータを取得できる。

副命題“確認すべき長期性能の評価に係るデータを取得できる”ことを満足するためには、具体的なモニタリング計画を立案できるのか、その目的を達成するために具体的な測定技術はあるのか、特に、長期に亘り実証された計測技術があることが必要となる。更に、モニタリングについてはバリア機能を損なわないことが求められており、その条件を満足する必要がある。

■ 副命題：3.2 取得したデータから長期性能を評価する解析技術がある

副命題“取得したデータから長期性能を評価する解析技術がある”ことを満足するためには、測定したデータを適切に解釈できるのか、その結果を用いて長期の予測が可能であることが必要となる。

(2) 主命題に対する全体のロジックツリー

これまでの検討を踏まえ、現状として整理した「主命題：A サイトにおいて要求性能を満足する緩衝材を構築することが可能である」に対するロジックツリーを図 7.4.3-7 に示す。一般に樹形図で表現されるものは、理解の観点であまり項目数を増やさないことが好ましく、本検討では得られた知見に基づき、これ以上の細分化は行わないこととした。

また、具体的なロジックの展開や記載事項についてはいろいろ議論が生じることも想定されるが、本検討では今後の取りまとめに向けた第一歩として全体を俯瞰できることが重要とし、現段階での考え方の一例として提示する。

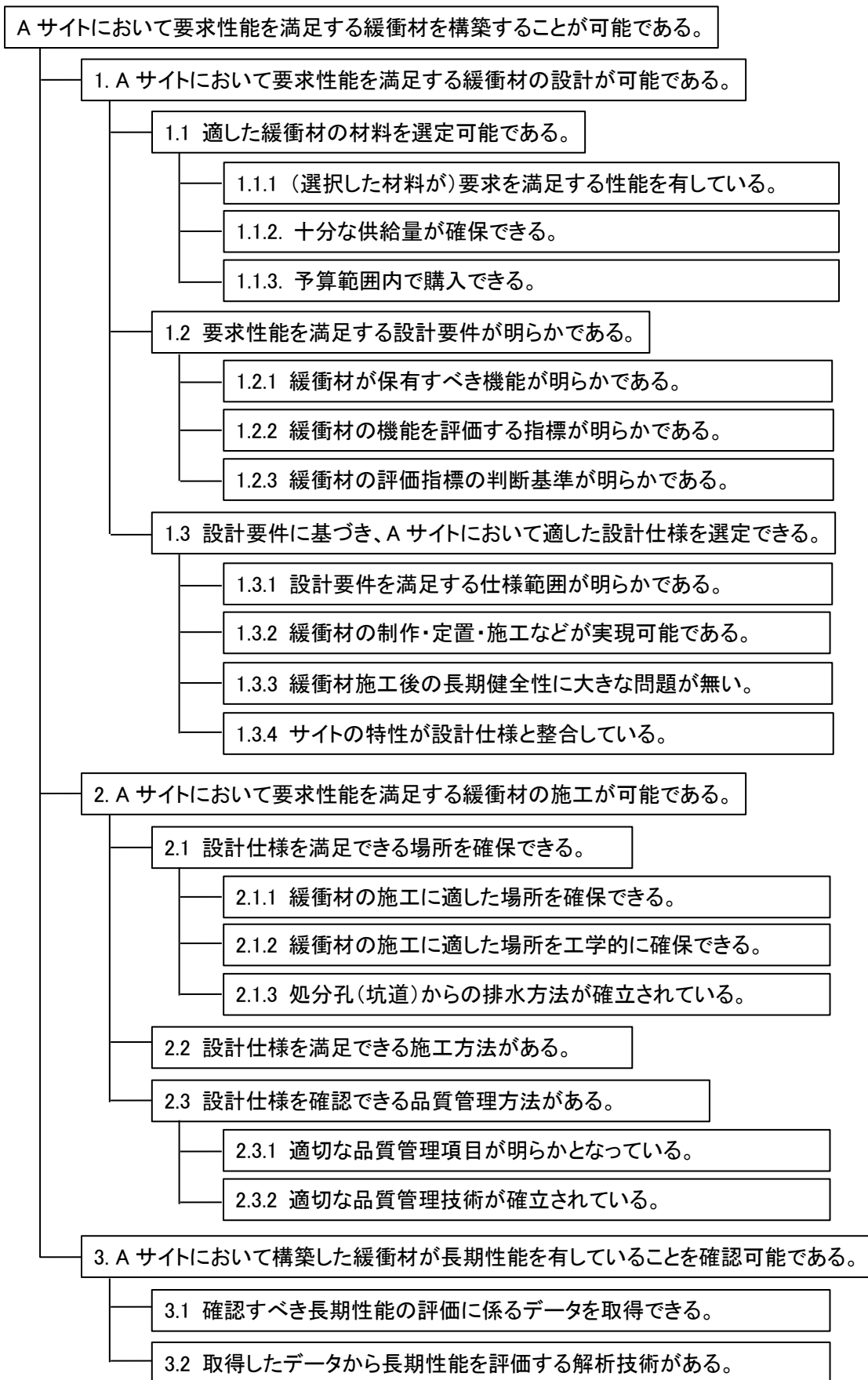


図 7.4.3-7 主命題：緩衝材を構築することが可能であるのロジックツリー

#### 7.4.4 検討の前提条件

本検討の前提条件としては、以下を取り上げる。

- ✓ 候補母岩： 新第三紀・先新第三紀の深成岩類
- ✓ 処分概念： 堅置き・ブロック方式

#### 7.4.5 概略評価の実施

##### (1) 概略評価のためのパラメータの設定の考え方

パラメータ（各分岐の重みと末端の証拠の信頼性など）は下記の考えに基づき、設定した。設定時には言語表現を用い、高（0.8）・中（0.5）・低（0.2）を適用した。また、高中低で表現しきれない場合は、+で調整可能となっている。海外での適用の場合はABCを適用している。これらの言語表現の関係を整理すると、表 7.4.5-1 のようになる。

設定に当たり、各分岐の支持及び不支持の重みは基本同じとした。ただし、異なる設定をした場合は、以下で別途補足している。

表 7.4.5-1 パラメータ設定に用いた言語表現とパラメータ値との関係

値	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
国内	低--	低-	低	低+	中-	中	中+	高-	高	高+	高++
海外	C--	C-	C	C+	B-	B	B+	A-	A	A+	A++

今回のパラメータの設定は専門家間のグループディスカッションによって決定した。

##### (2) 各分岐の重みの設定

上位命題に対する下位命題の重みを表 7.4.5-2 に示す。表中においては、言語表現によるその値と設定根拠を記載している。

表 7.4.5-2 各分岐の重みの設定結果、及び根拠

上位命題	下位命題	重み	設定根拠
A サイトにおいて要求性能を満足する緩衝材を構築することが可能である。	1 A サイトにおいて要求性能を満足する緩衝材の設計が可能である。	中+ (0.6)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・基本的には、設計と施工で緩衝材の要求を満足できる。</li> <li>・設計では、施工も考慮して行われるため、設計の十分性が少し高い。</li> <li>・モニタリングに依存しなくても主命題は基本満足できるはずである。</li> </ul>
	2 A サイトにおいて要求性能を満足する緩衝材の施工が可能である。	中 (0.5)	
	3 A サイトにおいて構築した緩衝材が長期性能を有していることを確認可能である。	低 (0.2)	
1 A サイトにおいて要求性能を満足する緩衝材の設計が可能である。	1.1 適した緩衝材の材料を選定可能である。	低 (0.2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・設計を満足する材料は世の中に数多くある。各材料に適した設計が可能である。</li> <li>・設計のためには設計要件の設定が重要である。次に、その設計要件を満足させることである。そのため、設計要件の十分性が少し高い。</li> </ul>
	1.2 要求性能を満足する設計要件が明らかである。	中+ (0.6)	
	1.3 設計要件に基づき、A サイトにおいて適した設計仕様を選定できる。	中 (0.5)	
2 A サイトにおいて要求性能を満足する緩衝材の施工が可能である。	2.1 設計仕様を満足できる場所を確保できる。	中+ (0.6)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・まずは設計仕様（施工品質）を満足する施工方法があることが重要となる。</li> <li>・次に、場所を確保できることが必要となる。</li> <li>・併せて品質を確認できることが求められる。</li> </ul>
	2.2 設計仕様を満足する施工方法がある。	高- (0.7)	
	2.3 設計仕様を確認できる品質管理方法がある。	中- (0.4)	
3 A サイトにおいて構築した緩衝材が長期性能を有していることを確認可能である。	3.1 確認すべき長期性能の評価に係るデータを取得できる。	高- (0.7)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・まずは長期性能の評価に係るデータを取得できることが重要である。</li> <li>・次に、予測のための解析技術が必要となる。</li> </ul>
	3.2 取得したデータから長期性能を評価する解析技術がある。	中 (0.5)	
1.1 適した緩衝材の材料を選定可能である。	1.1.1 (選定した材料が) 要求を満足する性能を有している。	中+ (0.6)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・基本は要求を満足する材料が選定できることである。</li> <li>・供給量及び費用については、その次のステップとなるため、十分性を少し下げている。</li> </ul>
	1.1.2 十分な供給量が確保できる。	中- (0.4)	
	1.1.3 予算範囲内で購入できる。	中- (0.4)	
1.2 要求性能を満足する設計要件が明らかである。	1.2.1 緩衝材が保有すべき機能が明らかである。	中+ (0.6)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・3つの命題とも重要であると共に、下位の3つ命題がそろって初めて上位命題を満足できることになる。</li> </ul>
	1.2.2 緩衝材の機能を評価する指標が明らかである。	中+ (0.6)	
	1.2.3 緩衝材の評価指標の判断基準が明らかである。	中+ (0.6)	
1.3 設計要件に基づき、A サイトにおいて適した設計仕様を選定できる。	1.3.1 設計要件を満足する仕様範囲が明らかである。	高 (0.8)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・基本はサイトに合わせて設計要件が決められる。</li> <li>・制作と長期健全性は基本設計仕様で考慮されているべきものであるため、十分性は低い。</li> </ul>
	1.3.2 緩衝材の制作・定置・施工などが実現可能である。	低+ (0.3)	
	1.3.3 緩衝材施工後の長期	低+	

	健全性に大きな問題が無い。	(0.3)	・サイトと設計との整合性は基本満足されていることが前提のため、支持の十分性は設定しない(0.0)。
	1.3.4 サイトの特性が設計仕様と整合している。	高(0.8) 不支持のみ	
2.1 設計仕様を満足できる場所を確保できる。	2.1.1 緩衝材の施工に適した場所を確保できる。	高-(0.7)	・好ましい場所が確保できることが前提となる。
	2.1.2 緩衝材の施工に適した場所を工学的に確保できる。	低+(0.3)	・工学的の対処には限界がある。
	2.1.3 処分孔(坑道)からの排水方法が確立されている。	高-(0.7)	・全てにおいて、坑道の排水方法を合理的に行えることが求められる。
2.3 設計仕様を確認できる品質管理方法がある。	2.3.1 適切な品質管理項目が明らかとなっている。	中+(0.6)	・品質管理項目及びその管理技術共に、どちらも重要である。
	2.3.2 適切な品質管理技術が確立されている。	中+(0.6)	

### (3) 証拠の入力

証拠(支持、及び不支持)は下記の考えに基づき、設定した。設定時にはパラメータと同様に表 7.4.5-3 に示す言語表現を用い、高(0.8)・中(0.5)・低(0.2)を適用した。また、高中低で表現しきれない場合は、+で調整した。

表 7.4.5-3 証拠の設定結果、及び根拠

証拠	証拠の値	設定根拠(論文リストのPDF-No.等)
1.1.1 (選定した材料が)要求を満足する性能を有している。	支持: 高(0.8)  不支持: 低-(0.1)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SKBでは代替材料に係る検討を実施しており、材料の選定に関して知見が積み重なりつつある。</li> <li>・日本では統一的な指標として有効モンモリロナイト乾燥密度が提案されている。</li> <li>・有効ベントナイト乾燥密度と圧密圧力の関係を示す e-log P 曲線から、同じ圧密圧力になる有効ベントナイト乾燥密度が求まる(021、136)。</li> <li>・乾燥密度差のあるベントナイトは再冠水後も密度差が残るため、材料の選定においては留意が必要である(021、136、137)。</li> <li>・モンモリロナイト含有率が同じでも透水係数が変わる場合がある。</li> </ul>
1.1.2 十分な供給量が確保できる。	支持: 高(0.8)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・本来、材料に応じた設計をすべきであり、材料を特定する必要はないと考えられる。</li> </ul>
1.1.3 予算範囲内で購入できる。	支持: 中(0.5)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・材料を特定する必要はないと考えられるため、市場価格は大きく変わらないと考えられる。</li> </ul>
1.2.1 緩衝材が保有すべき機能が明らかである。	支持: 中+(0.6)  不支持: 低(0.2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・NUMOが緩衝材の安全機能に係る設計要件を提示済みである(NUMO)。</li> <li>・緩衝材の不飽和から飽和に至る期間に緩衝材の性能に与える要因(乾燥密度、流入量、地下水組成、緩衝材成分、隙間、浸潤速度等)に関しても何かしら設計要件に加えるべき。(現状は最終形での設計要件に読めるため、例え</li> </ul>

		<p>ば、下記の配慮が必要。)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・パイピングの形成過程として、最初はセルとの境界面に複数発生するが、やがて1本に収斂する(027、031、129)。</li> <li>・蒸留水を大小ペレット混合に通水する場合、水みちが閉塞する流量は0.001L/minである。0.005L/min以上ではパイピングが発生する(027、031、129)。</li> <li>・蒸留水を大小ペレット混合に通水する場合、パイピングが発生している時の通水圧は20～25kPaである(031、129)。</li> <li>・地下水0.5M NaClを高さ1mの緩衝材ブロックに通水した場合は、ケイ砂が沈殿し、自己修復が妨げられる現象が発生した(027、0.31)。</li> <li>・人工不陸とペレットは、効果の発現時期が異なることから両者を併用すると工学的対策として効果がある(101)。</li> </ul>
1.2.2 緩衝材の機能を評価する指標が明らかである。	<p>支持： 中+ (0.6)</p> <p>不支持： 低 (0.2)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・NUMOが緩衝材の安全機能に係る設計要件に基づき指標を提示済みである(NUMO)。</li> <li>・NUMOの設計要件の指標にペクレ数などが挙げられているが、SKBと同様に可能であれば緩衝材の物性に直接かかわる指標とすべきである(例えば、乾燥密度など)。(また、再冠水過程の下記の配慮が必要)</li> <li>・長期性能初期状態の設定、モンモリロナイト含有量、Ca型化の程度など(30)</li> </ul>
1.2.3 緩衝材の評価指標の判断基準が明らかである。	<p>支持： 中+ (0.6)</p> <p>不支持： 低 (0.2)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・NUMOが緩衝材の安全機能に係る設計要件の指標に基づき基準を提示済みである(NUMO)。</li> <li>・NUMOの設計要件の指標にペクレ数の値などが挙げられているが、SKBと同様に可能であれば緩衝材の物性に直接かかわる指標の基準値とすべきである(例えば、乾燥密度など)。</li> </ul>
1.3.1 設計要件を満足する仕様範囲が明らかである。	<p>支持： 中+ (0.6)</p> <p>不支持： 低 (0.2)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・NUMOが設計要件を満足する緩衝材の仕様範囲を提示済みである。</li> <li>・仕様設定根拠が明示されていない。</li> </ul>
1.3.2 緩衝材の制作・定置・施工などが実現可能である。	<p>支持： 中+ (0.6)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・NUMOが緩衝材ブロックの制作可能性から密度を設定している。</li> </ul>
1.3.3 緩衝材施工後の長期健全性に大きな問題が無い。	<p>支持： 低+ (0.3)</p> <p>不支持： 低+ (0.3)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・予測は外挿のため支持の程度が低い。(ただし、対象が力学のため、化学などに比べれば比較的やり易い。)</li> <li>・時間軸(長期)に対する実験データがない。</li> <li>・クリープ挙動は学術的に不明な点が多い。</li> </ul>
1.3.4 サイトの特性が設計仕様と整合している。	(未設定)	(サイト未設定のため)
2.1.1 緩衝材の施工に適した場所を確保できる。	<p>支持： 高 (0.7)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・NUMOが代表的な各岩種において十分な利用率があることを提示している。</li> </ul>
2.1.2 緩衝材の施工に適した場所を工学的に確保できる。	<p>支持： 低+ (0.3)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・例えば、湧水などに対してグラウチングによる止水やシートなどによる地下水への接触回避なども検討されているが、不十分である。</li> </ul>
2.1.3 処分孔(坑道)からの	支持：	<ul style="list-style-type: none"> <li>・堅置きを対象とした場合、一般的な手法のみで</li> </ul>



排水方法が確立されている。	低+ (0.3)	あり、対処方法に関して十分な議論はされていない(例えば、対処方法としてSKBが用語として用いている self-drain などの適用などがある)。
2.2 設計仕様を満足する施工方法がある。	支持： 中- (0.4)	<ul style="list-style-type: none"> <li>遠隔での施工技術や隙間充填などの技術的実証が課題として挙げられる。(下記は吹付け工法に関する参考情報。)</li> <li>吹付け工法は、乾燥密度差が少ない(107、109、118、119、121、138、139、140、141、143、164、165、166、167)。</li> <li>吹付け工法は、遠隔化を実施中である(107)。</li> <li>狭隘箇所におけるベントナイト施工技術である(169)</li> <li>ペレット充填工法は、止水性を向上する。(128)</li> <li>ペレットの遠隔充填方法がある(365)</li> </ul>
2.3.1 適切な品質管理項目が明らかとなっている。	支持： 高- (0.7)	品質管理項目の基本は、締固め後の乾燥密度である。ただし、緩衝材ブロックの場合、隙間充填等の管理が課題として挙げられる。
2.3.2 適切な品質管理技術が確立されている。	支持： 低+ (0.3)	遠隔での施工技術などの技術的実証が課題として挙げられる。
3.1 確認すべき長期性能の評価に係るデータを取得できる。	支持： 低+ (0.3)  不支持： 低+ (0.3)	<ul style="list-style-type: none"> <li>室内で溶解速度などは取得可能であるが、原位置では困難である。</li> <li>ある程度の限られた期間や項目に対して、①数値解析による予測値との比較や、②設計や安全評価の前提条件の確認などは可能性がある[2]。</li> <li>長期に関しては超外挿のため不確実性が高い。</li> </ul>
3.2 取得したデータから長期性能を評価する解析技術がある。	不支持： 高 (0.8)	連成、モデルの整備が不十分である。

#### (4) 評価のまとめ

主命題の支持は主に「1 設計」と「2 施工」により、形成され、不支持は主に「3 確認」により形成されると考えられる。

- 今後、各証拠の不確実性の部分のデータを拡充できれば、主命題の信頼性が向上することとなる。
- 全体を鑑みると主命題の信頼性を向上させるためには、「2.2 設計仕様を満足する施工方法の開発」や「1.3.1 設計要件を満足する仕様範囲の提示」、「2.1.1 緩衝材の施工に適した場所の確保方法の開発」、「2.1.3 処分孔(坑道)からの排水方法の確立」の支持の程度を上げることが重要であると言える。

#### 7.4.6 概略評価のまとめ

緩衝材の設計・施工に関する現状の技術レベルの概略評価を試みた。その結果を以下に示す。

- 主命題「要求性能を満足する緩衝材が構築できること」を満足するための考え方をロジックツリーとして表現することができた。
- ロジックツリーを適用することにより、専門家の知見に基づき、上位命題に対する下位命題や証拠の重みを表現でき、その結果、各項目の重要度を提示することが可能となった。

- また、末端の証拠の現状の信頼性を支持と不支持で表現することにより、どの程度の知見やデータが現在存在するか、しないかなどを提示することができた。
- また全体を鑑み、「設計仕様を満足する施工方法の開発」や「設計要件を満足する仕様範囲の提示」、「緩衝材の施工に適した場所の確保方法の開発」、「処分孔（坑道）からの排水方法の確立」などが優先度の高い研究課題であることを明らかにした。

以下には概略評価の過程において整理された知見に基づき、考察を加える。

- 末端の証拠の検討において、設計に関して例えば設計要件の判断基準などにおいて、スウェーデンは緩衝材の物性に係わる直接的な指標を採用しており、わが国においてもある程度サイトや材料が特定された段階で、同様な考え方を採用すべきである。
- 施工に関してはブロック工法、吹付け工法やペレット充填工法などがあるが、各施工方法において施工後の再冠水挙動が異なり、最終的な緩衝材の品質に与える影響は異なると考えられる。よって、今後設計要件の具体化においては、施工方法に応じて検討することも必要になると考えられる。
- 現状、設計と施工で要求性能を満足する緩衝材が構築できることを提示する計画が提示されているが、第二種廃棄物埋設の動向を考えると第一種廃棄物埋設でもある程度モニタリングを実施していくことが必要になると考えられる。今回の調査ではベントナイトブロックを吹付け工法で製作することにより、ブロック内にモニタリング機器（地中無線方式）を封入することができることが明らかとなった（No.22）。吹付け工法と地中無線方式の採用は、モニタリングの行為がバリアの機能や性能に与える影響をかなり少なくさせることができる（ケーブルの敷設による水みちの形成や不十分な締固めを生じさせない）。今後は、モニタリングの観点で施工方法を選定することも検討すべきである。

ロジックツリーなどを活用すれば、現状の考え方や知見を整理することにより、同じ研究分野の専門家に加え、様々な研究分野間での情報共有を図る基盤を整備することができる。この検討過程において専門家間で合意が得られなければ、得られないことに意味があり、どこのどの点が合意に至っていないのか議論するときの、有効な手段となる。今後も引き続き、このような検討を継続していくべきである。

#### 7.4.7 評価の定量化のための方法の検討

ロジックツリーを用いた評価を、より定量的に分析する方法として ESL (Evidential Support Logic) と言われる方法がある。緩衝材の技術要件を達成するために十分な知見、技術等が準備されているかどうかを数値化して分析するための方法の一つとして、以下にその方法について述べる。

##### (1) ESL について

ESL は、資源（石油）探査分野や経営工学分野などで適用されており、様々な判断要素を考慮

できる意思決定手法 AHP (Analytic Hierarchy Process) に、不確実性の定量的評価手法である IPT (Interval Probability Theory、区間確率理論) を組み込んだものである。特長としては、①階層構造により命題に対する判断プロセスを提示でき (図 7.4.7-1)、②区間確率理論を用いることにより、判断時に生じる不確実性 (図 7.4.7-2 ; 支持 (緑) ≠ 1-不支持 (赤)、不確実性 (白) が存在) を定量的に評価できることである。

その結果、不確実性を考慮した形で命題の現状を理解することができ、さらに現状の理解を深めるために次段階において何をすべきかの意思決定を支援できる。

ESL は、わが国の高レベル放射性廃棄物の地層処分における概要調査地区選定における法定要件に関する事項 (個別地区ごとに評価する事項) や付加的に評価する事項において、評価の考え方を明確にすると共に、使用するデータが地域ごとに異なり、かつ、判断に用いた情報の質や量に関連する不確実性を取り込むために検討に活用できる状態[3][4][5][6]となっている。

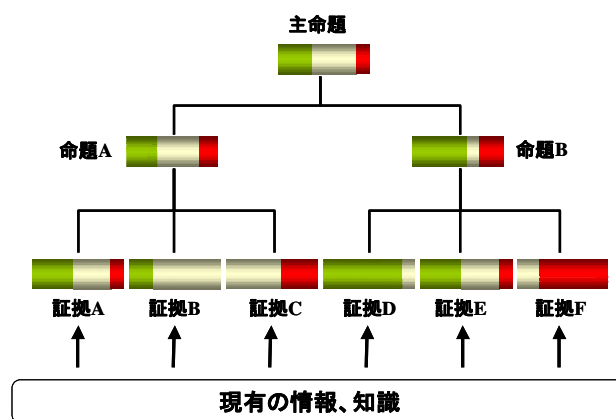


図 7.4.7-1 ESL による解析イメージ

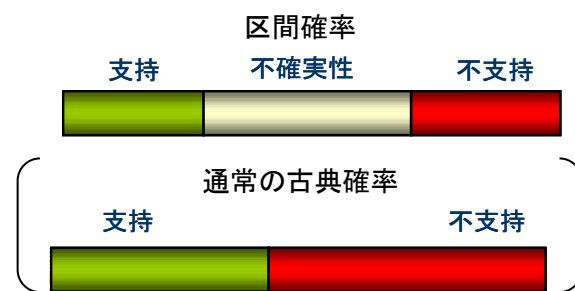


図 7.4.7-2 ESL が用いる区間確率理論

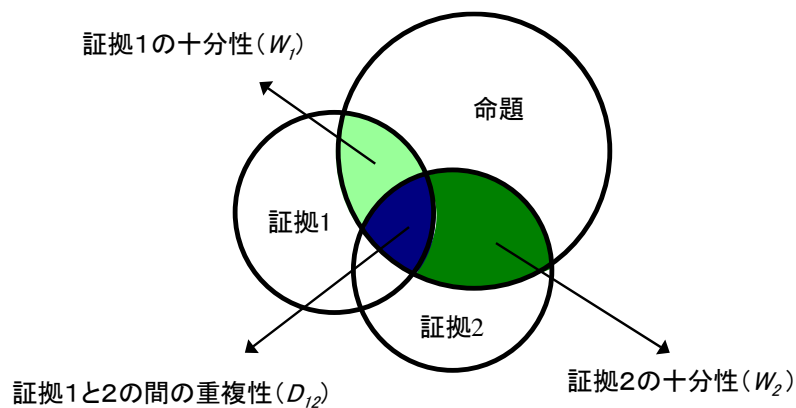
## (2) ESL の解析手順

本手法による解析手順を整理すると、以下のようになる。

- ① 樹形図の構築：命題を設定し、命題を評価できる階層構造 (樹形図) を構築する。樹形図の構築では、概念的な主命題からトップダウンで具体的な証拠 (Evidence) まで展開する。樹形図の妥当性に関しては MECE (Mutually Exclusive and Collectively Exhaustive : 相互に重なりなく、漏れない) の考えを取り込むと共に、下部命題から上位命題へ So What? (こ

れらから言えることは何か?) と、上位命題から下部命題へ Why So? (なぜそのようなことが言えるのか?) で確認することが重要となる。

- ② パラメータの入力：専門家の知見やインタビューなどによりパラメータを入力する。パラメータには、図 7.4.7-3 上に示すように証拠の上位命題への貢献度を意味する十分性（条件付確率、下位命題が成立（100%支持）するときに、上位命題が成立する確率）と証拠間の情報の重なり具合を示す重複性などがある。
- ③ 証拠の入力：樹形図の各証拠に、図 7.4.7-3 下に示す区間確率理論に基づいて支持、不支持を設定する。
- ④ 解析の実行：図 7.4.7-3 下に示した考えに基づき支持、不支持の程度をそれぞれ計算する。
- ⑤ 解析結果の表示：解析結果は、図 7.4.7-4 に示す Ratio Plot を用い可視化することができる。Ratio Plot は、横軸に不確実性を、縦軸は支持／不支持を対数で表示している。図 7.4.7-4 中濃い緑（赤）は、支持（不支持）である確度が高いことを意味している。薄い緑（赤）は、支持（不支持）であるが、不確実性が高いことを意味している。
- ⑥ 感度解析の実施：樹形図の末端の証拠の支持を例えば 0.1 変化させることにより、証拠の命題に対する感度を知ることができる。この結果により、証拠の重要度分類ができる。詳細は次項参照のこと。



ESLにおける各パラメータの意味

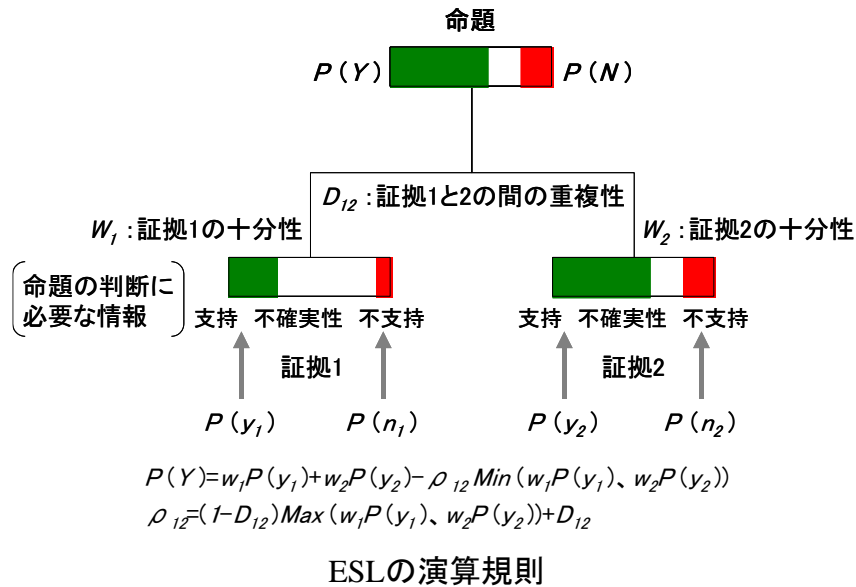


図 7.4.7-3 ESL パラメータ (十分性と重複性) と演算規則

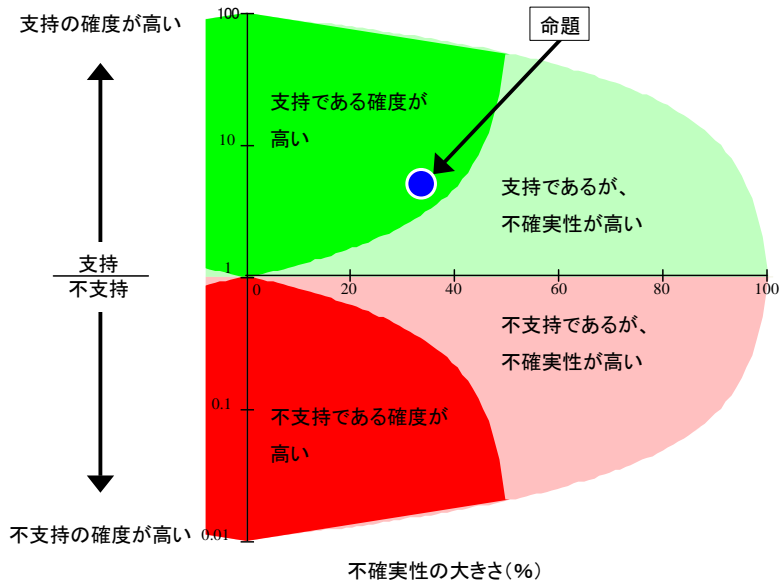


図 7.4.7-4 Ratio Plot による結果の可視化

(3) ESL による感度解析のイメージ

感度解析を行った場合のイメージを図 7.4.7-5 に示す。図 7.4.7-5 は今後収集すべき知見やデータに関する優先度を意味しており、それぞれの知見やデータにおいて支持 (For) する結果が得られた場合の主命題に対するインパクト (%)、不支持 (Against) する結果が得られた場合の主命題に際するインパクト (%) を評価することが可能になる。

この結果は、今後の試験計画立案に寄与するものである。

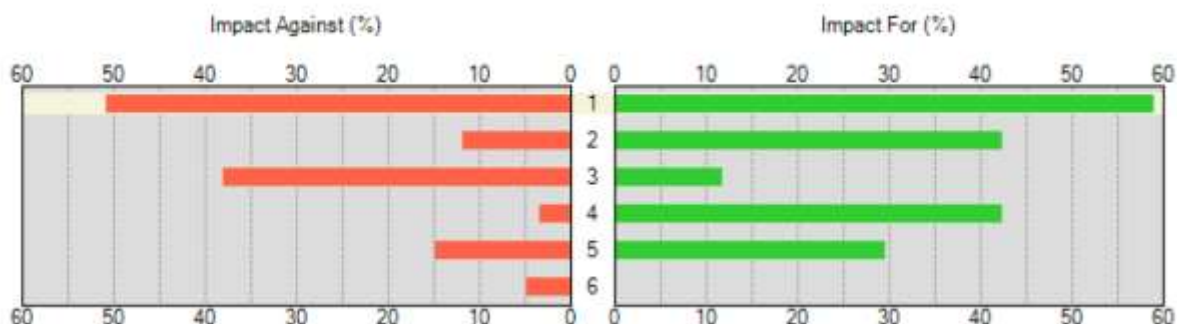


図 7.4.7-5 感度解析のイメージ

#### (4) ESL 解析結果

以下に本調査結果を基にした概略評価結果を示す。ロジックツリーに証拠を入力し、計算した結果については Tree Plot (図 7.4.7-7 図 7.4.7-6) として表示する。次に、評価結果の可視化については Ratio Plot (図 7.4.7-7) として表示する。感度解析結果については Tornado Plot (図 7.4.7-8) として表示する。

ESL による概略評価の概要を取りまとめると下記ようになる。

##### 【Tree Plot】

- ・ 今回の概略評価の結果、主命題の支持は 61%、不確実性は 12%、及び不支持は 26%となった (計算結果の四捨五入の関係上、合計が 100%にならない場合がある)。
- ・ 主命題の支持は主に「1 設計」と「2 施工」により、形成され、不支持は主に「3 確認」により形成されている。
- ・ 今後、不確実性の部分のデータを拡充できれば、主命題の信頼性が向上することとなる。

##### 【Ratio Plot】

- ・ ESL の評価結果を可視化することにより、各命題や証拠の信頼性を表現することができ、主命題は濃い緑色 (支持 > 50%) に位置付けられており、現段階で十分な信頼性があることがわかる。
- ・ 各証拠を中央上 (濃い緑色) に集めることができれば、全体の信頼性がさらに上がることになる。

##### 【Tornado Plot】

- ・ 現段階では不支持より支持の証拠が多いため、全体の感度としては不支持側の方が支持側より高い結果となった (主命題に対し、証拠の緑よりも赤の方が感度が高くなっている)。
- ・ 主命題の信頼性を向上させるためには、「2.2 設計仕様を満足する施工方法の開発」や「1.3.1 設計要件を満足する仕様範囲の提示」、「2.1.1 緩衝材の施工に適した場所の確保方法の開発」、「2.1.3 処分孔 (坑道) からの排水方法の確立」の支持の程度を上げることが重要であると言える。

以上のように、ESL を適用することにより、専門家の知見に基づき、上位命題に対する下位命

題や証拠の重みを十分性というパラメータで表現した。その結果、各項目の重要度を提示することができることが示された。また、末端の証拠の現状の信頼性を区間確率というパラメータで表現することにより、現在どの程度の知見やデータが存在するか、しないかなどを提示することができる可能性がある。



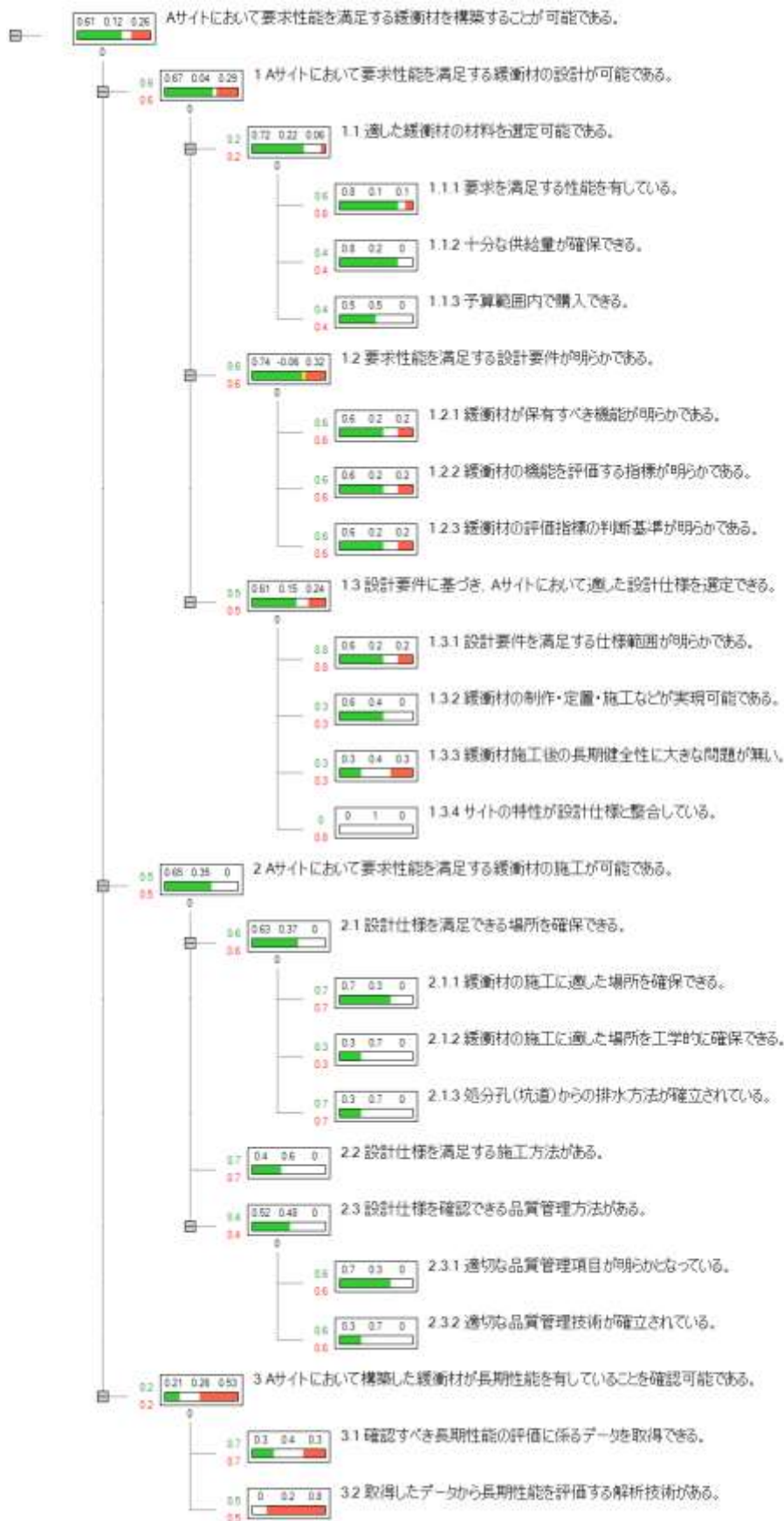
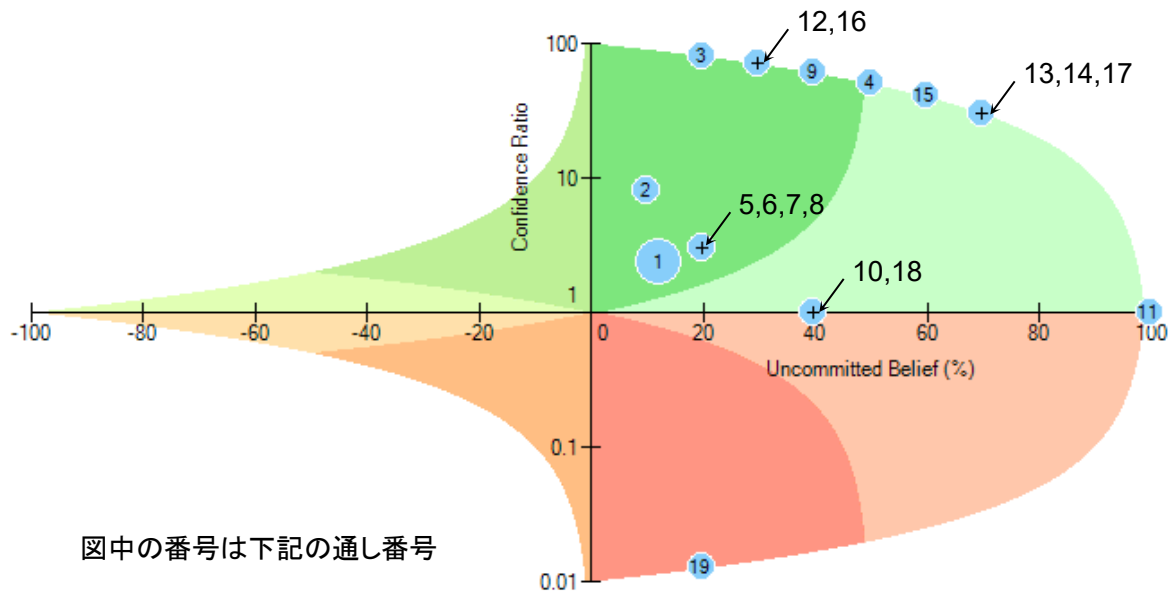


図 7.4.7-6 Tree Plot

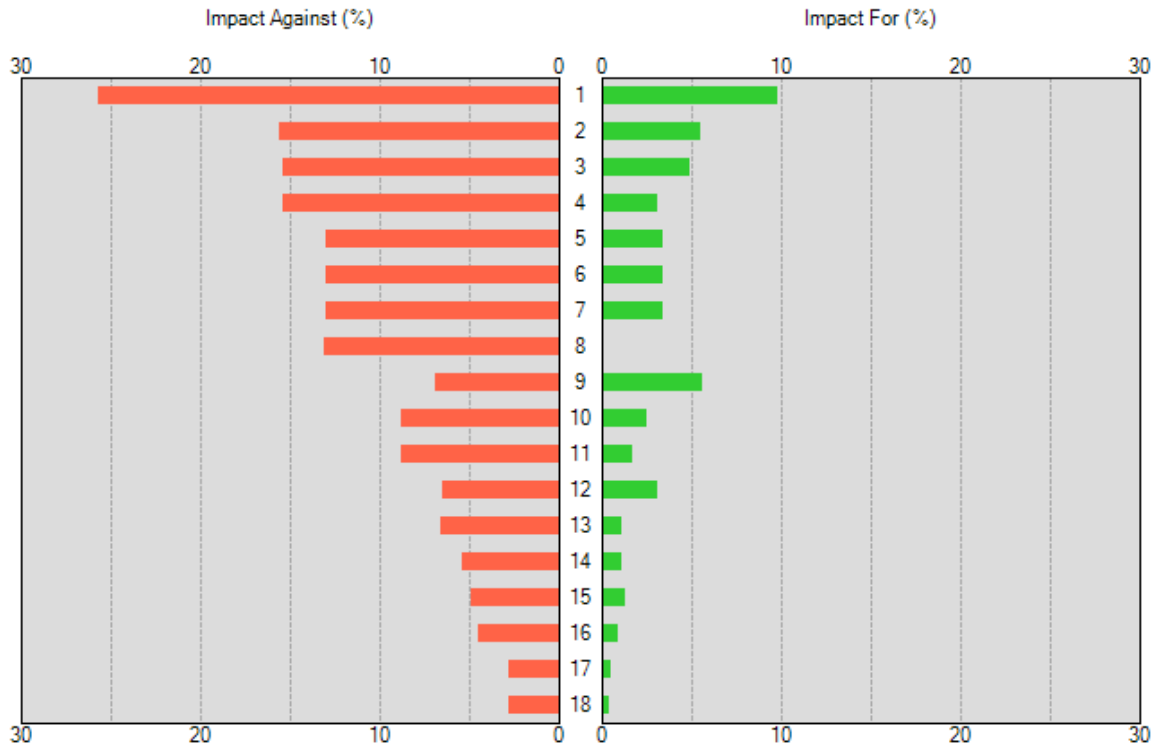
Aサイトにおいて要求性能を満足する緩衝材を構築することが可能である。



- 1: Aサイトにおいて要求性能を満足する緩衝材を構築することが可能である。
- 2: 1.1.1 要求を満足する性能を有している。
- 3: 1.1.2 十分な供給量が確保できる。
- 4: 1.1.3 予算範囲内で購入できる。
- 5: 1.2.1 緩衝材が保有すべき機能が明らかである。
- 6: 1.2.2 緩衝材の機能を評価する指標が明らかである。
- 7: 1.2.3 緩衝材の評価指標の判断基準が明らかである。
- 8: 1.3.1 設計要件を満足する仕様範囲が明らかである。
- 9: 1.3.2 緩衝材の制作・定置・施工などが実現可能である。
- 10: 1.3.3 緩衝材施工後の長期健全性に大きな問題が無い。
- 11: 1.3.4 サイトの特性が設計仕様と整合している。
- 12: 2.1.1 緩衝材の施工に適した場所を確保できる。
- 13: 2.1.2 緩衝材の施工に適した場所を工学的に確保できる。
- 14: 2.1.3 処分孔(坑道)からの排水方法が確立されている。
- 15: 2.2 設計仕様を満足する施工方法がある。
- 16: 2.3.1 適切な品質管理項目が明らかとなっている。
- 17: 2.3.2 適切な品質管理技術が確立されている。
- 18: 3.1 確認すべき長期性能の評価に係るデータを取得できる。
- 19: 3.2 取得したデータから長期性能を評価する解析技術がある。

図 7.4.7-7 Ratio Plot

Aサイトにおいて要求性能を満足する緩衝材を構築することが可能である。



- 1: 2.2 設計仕様を満足する施工方法がある。
- 2: 1.3.1 設計要件を満足する仕様範囲が明らかである。
- 3: 2.1.1 緩衝材の施工に適した場所を確保できる。
- 4: 2.1.3 処分孔(坑道)からの排水方法が確立されている。
- 5: 1.2.1 緩衝材が保有すべき機能が明らかである。
- 6: 1.2.2 緩衝材の機能を評価する指標が明らかである。
- 7: 1.2.3 緩衝材の評価指標の判断基準が明らかである。
- 8: 1.3.4 サイトの特性が設計仕様と整合している。
- 9: 3.1 確認すべき長期性能の評価に係るデータを取得できる。
- 10: 2.3.1 適切な品質管理項目が明らかとなっている。
- 11: 2.3.2 適切な品質管理技術が確立されている。
- 12: 3.2 取得したデータから長期性能を評価する解析技術がある。
- 13: 2.1.2 緩衝材の施工に適した場所を工学的に確保できる。
- 14: 1.3.3 緩衝材施工後の長期健全性に大きな問題が無い。
- 15: 1.3.2 緩衝材の制作・定置・施工などが実現可能である。
- 16: 1.1.1 要求を満足する性能を有している。
- 17: 1.1.2 十分な供給量が確保できる。
- 18: 1.1.3 予算範囲内で購入できる。

図 7.4.7-8 Tornado Plot

## 7.5 処分場の概念に関する提案

### 7.5.1 処分場概念の最適化に関する考え方

放射線廃棄物処分に関しては、NUMO 殿が包括的技術報告書「わが国における安全な地層処分の実現性 ～サイト選定で想定される多様な地質環境を対象としたセーフティケース～」の執筆を進めており、我が国におけるセーフティケースについての検討を進めている。この報告書の 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資料の中でも触れられているように、2015 年に閣議決定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」[7]では、回収可能性の維持に関する検討も求められている。回収可能性を考えた場合には、回収の容易性の確保のための処分概念の検討も考えられる。

また、原子力規制委員会の検討チームの一つである“廃棄物埋設の放射線防護基準に関する検討チーム”では「放射性廃棄物の埋設に係る管理期間終了後の放射線防護のための基準について（案）」[8]について審議しており、その中で放射線防護の最適化について求めている。具体的には下記のように求めている（下線斜体太字は本報告書で装飾）。

「放射線防護の最適化に向けた取組として、線量低減のためのプロセスを確認するための規制要求を行うこととする。このプロセスは、例えば処分システムのそれぞれの要素の機能、性能及びその配分の考え方を明確にすること、それらの要素に影響を及ぼし得る要因、各要素間の相互関係等も考慮し、適用可能な設計要素間で取りうる選択肢を比較すること、不確実性をできるだけ小さくする対策を検討すること、適用可能な最善の技術を検討すること、それらによって線量を低減する対応（設計）が講じられていること、それらの対策の合理性を検討すること等からなる。これらの検討を通じて、種々の事象を通じて公衆が受ける線量、処分システムの各要素の性能、それらの説明性、内包される不確実性等が明らかにされる。」

これらを整理すると、“適用可能な最善の技術を選択肢に加え、なぜ申請時に提示する最終形態を選んだが、そのプロセスを確認する”、言い換えれば“どのように選択肢を抽出し、どのような評価指標に基づいて意思決定（選択）したか”と読み取ることができる。

また、その後に議論[9]された「廃棄物の埋設に係る放射線防護基準及び原子力施設のサイト解放基準について（案）」においても、下記の記載がある。

「廃棄物埋設施設の設計に当たっては、埋設事業所敷地内における深度を含む埋設地の配置、施設形態、各部位の材料、寸法、施工方法等が検討される。

これらを踏まえると、現状の知見にこだわることなく、選択肢を準備しておくことが重要となる。以下に、今回の検討から派生した選択肢を提示する。

## 7.5.2 処分場概念に関する選択肢（例）

### (1) 廃棄体一体の横置き処分

#### 1) 現状の選択肢の課題

前章でも示したが、処分坑道から処分孔を掘削すると、図 7.5.2-1 に示すように、その孔はいわば湧水の釜場の役割を果たし、地下では水の溜まり場となる。そのような状態で処分孔から揚水ポンプなどで排水を続け、かつ緩衝材の施工時にも同様に実施続けること（上手

く排水できるかという、課題もある)は技術的な観点からみると合理的な方法とは言いづらい。

また、処分孔掘削後は孔壁の地質観察が行われると考えられるが、処分孔の高さは4.2mもあり、その観察自体が高所作業となる。また、一つの処分坑道に定期的なピッチで床面に2.2m径の穴が多数開いているということ自体が、特に安全性の観点からみると合理的な方法とは言いづらい。

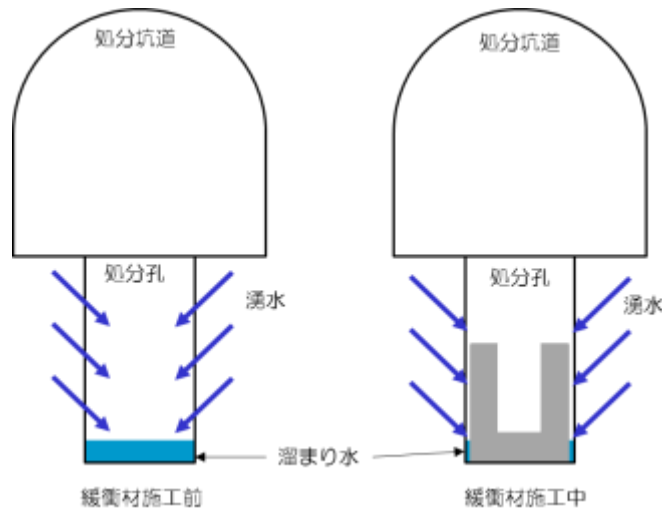


図 7.5.2-1 処分孔からの排水の必要性

## 2) 提案する選択肢

地下水を含め、水は自然の法則に従い、高いところから低いところに流れる。その点を考えると、処分孔の位置を処分坑道よりも高い位置に置くことが必要となる。

そのような場合、図 7.5.2-2、図 7.5.2-3 に示すように縦置き代わりに(僅かな傾斜を持たす)横置きを採用することが適していると言える。緩衝材施工前までも施工中もいわゆる自然に排水をすることが可能となる (self-drain)。また、安全性の観点からも孔壁の観察時に高所作業が無くなることと、移動に用いる坑道の床面に多数の穴が無くなることになる。

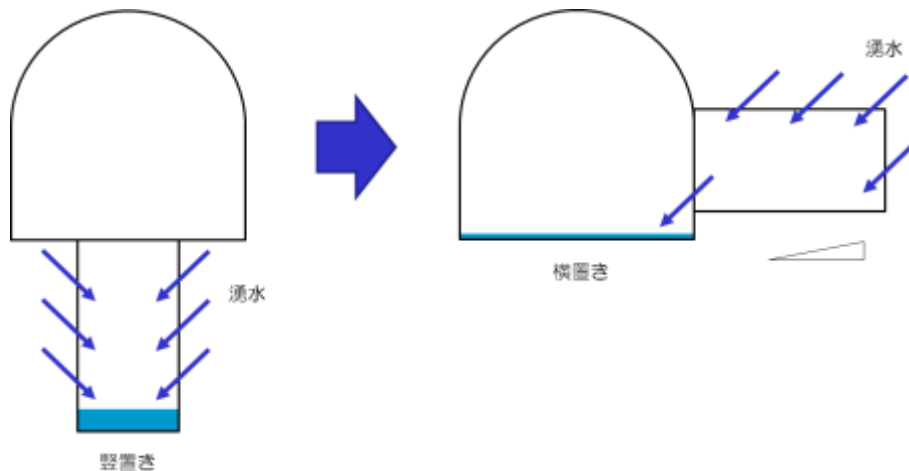


図 7.5.2-2 排水が容易な廃棄体横置きイメージ

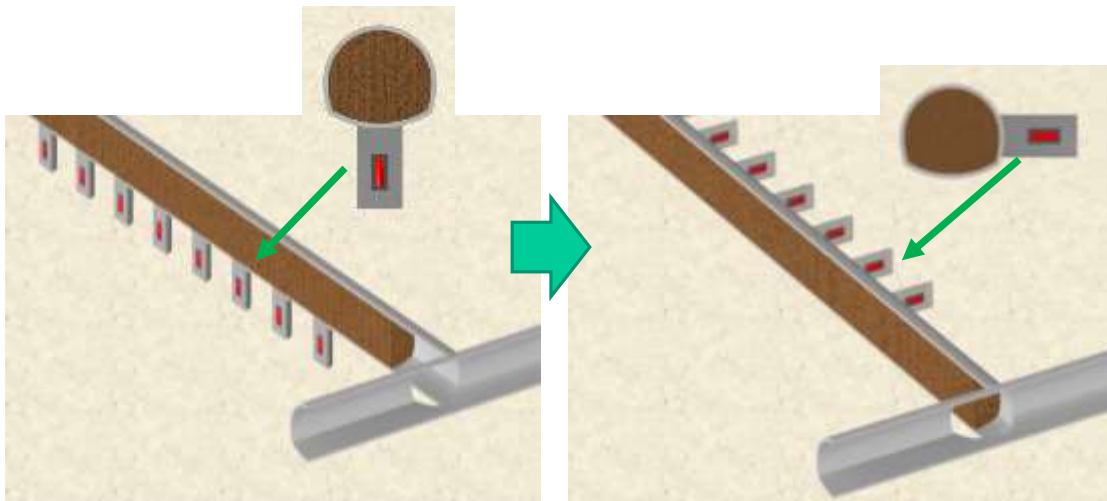


図 7.5.2-3 横置き全体のイメージ（縦置きとの比較）

このような概念は既に地層処分研究開発第2次取りまとめ[1]において、図 7.5.2-4 のように示されているものである。

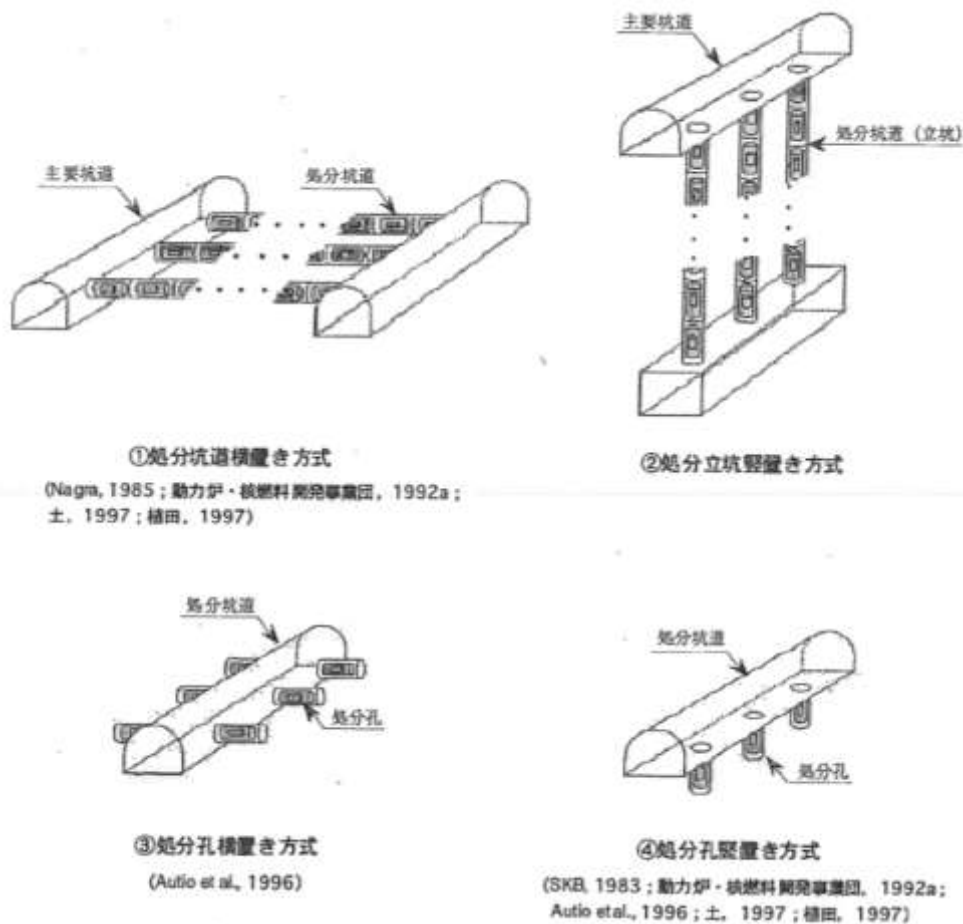


図 7.5.2-4 定置レイアウトのバリエーション[1]



(2) 廃棄体定置位置の地質環境に応じたカスタマイズ方法

1) 現状の選択肢の課題

先ず、地質環境調査の研究対象の一つである「断層・破碎帯分布」を対象とし、その推定結果に伴う不確実性の例[10]を以下に示す。

JAEAが岐阜県瑞浪市で進めている超深地層研究所計画では、深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備の一環で、地表からの調査予測研究段階（第1段階）のStep0～4の各段階において、図7.5.2-5に示すように地質構造モデルの構築[10]が行われている。

図7.5.2-5は、一番左側の既得情報のみの地質構造モデル（月吉断層以外の断層・破碎帯は記載されていない）から、順次右側に原位置での弾性波探査やボーリング調査結果を加味することにより、場の理解度が向上し、見直された地質構造モデルを示している。具体的には、調査段階が進展（右側に移行）するに伴い、断層・破碎帯の追記や形状の修正などが生じている。ここで示す「断層・破碎帯分布」のモデル化も事前調査段階の地質環境特性の解釈に、不確実性が存在していたにも係わらず、それを十分に認識していなかった一つの事例である。

このことから、図7.5.2-6に示すように事前に決められた施設レイアウトにおいて、廃棄体を定置できる処分孔であるか、否かを湧水量で判断することは合理的な方法ではない。現地で得られる情報を用いて、廃棄体を定置する処分孔の位置を探ることが一番適していると言える。

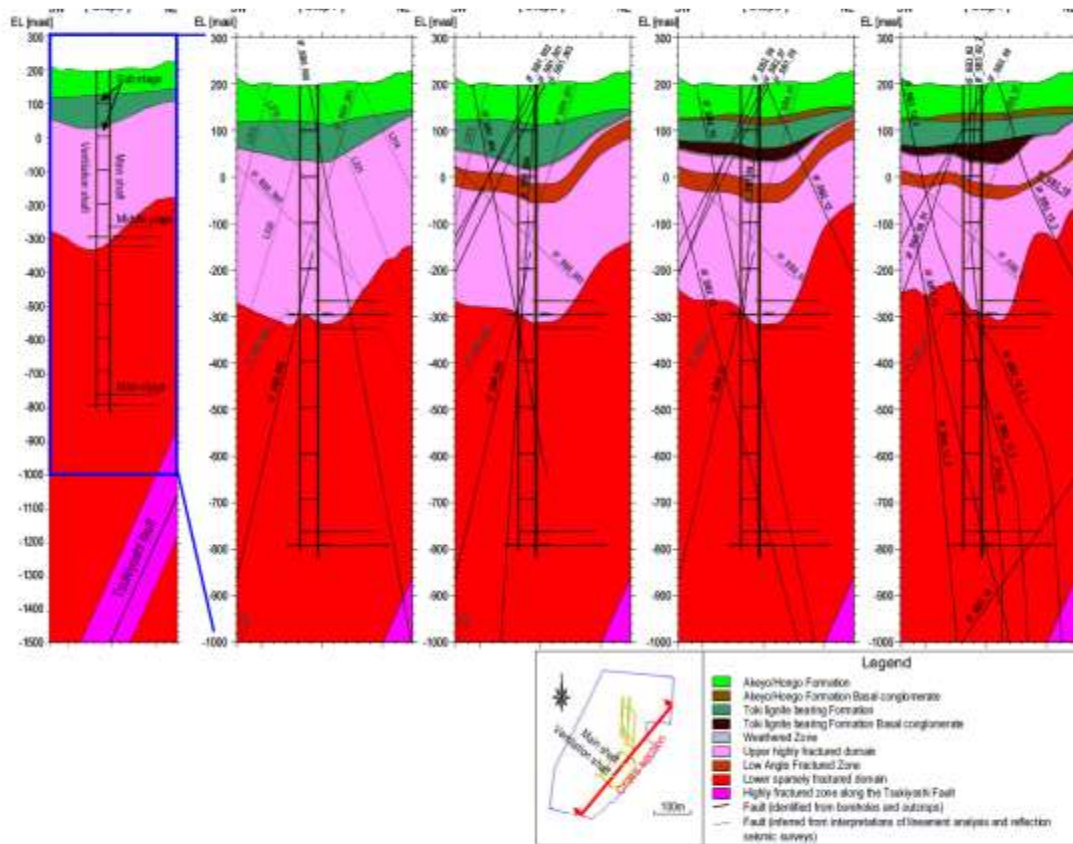


図 7.5.2-5 第1段階のStep0～4における地質構造モデルの変遷[10]



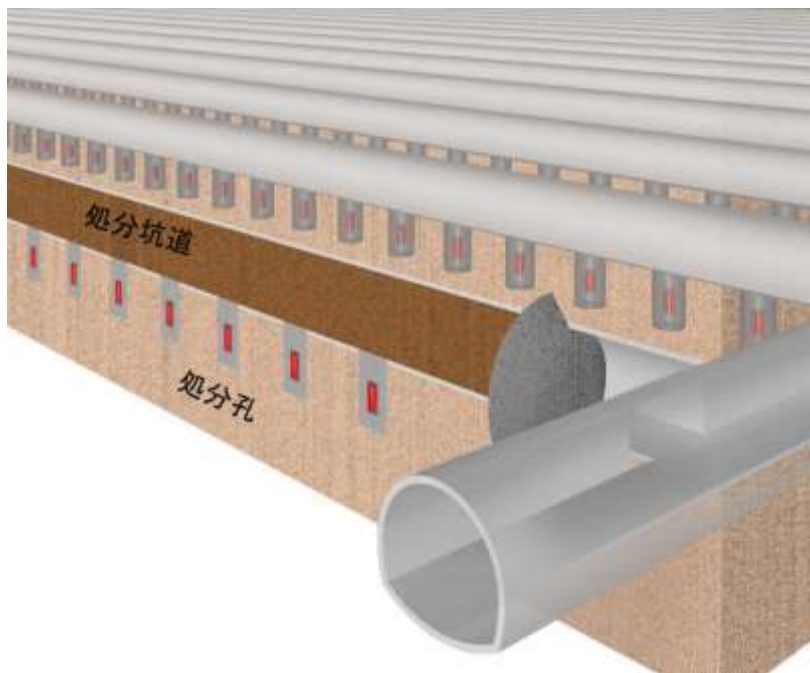


図 7.5.2-6 現状考えられている施設レイアウトと処分孔配置のイメージ

## 2) 提案する選択肢

例えば、不均質な地質環境において、主要坑道と一部の処分坑道を掘削後に、実際の地下深部で面的に得られた情報に基づき、図 7.5.2-7 や図 7.5.2-8 に示すように処分（廃棄体定置場所を含む）に適した場所を探す可変型処分坑道レイアウト[11]が提案されている。

この方法を用いれば地下深部の処分に適した場所を選ぶことができ、以下のメリットがある。

- 廃棄体定置場所が増える。
- 止水及び掘削が必要な破砕体などとの遭遇回数が減る。
- トータルの湧水処理量が減る。
- プラグの設置数が減らせる。

地質環境の不均質性にもよるが、ある程度不均質性が大きい場合は合理的な方策であると言える。

また、(1)で示したような考えを不均質な地質環境に適用すると、図 7.5.2-9 のように処分坑道を周辺の好ましいエリアに廃棄体を定置する方策も考えられる。

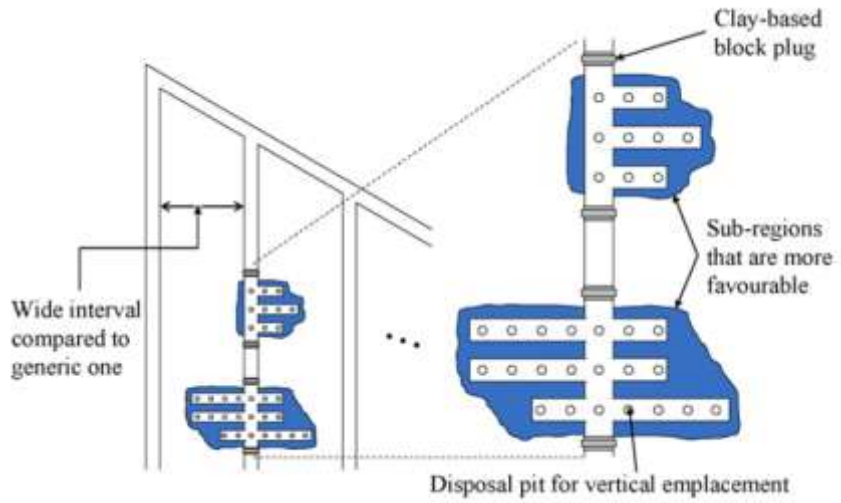


図 7.5.2-7 可変型処分坑道レイアウト概念[11]

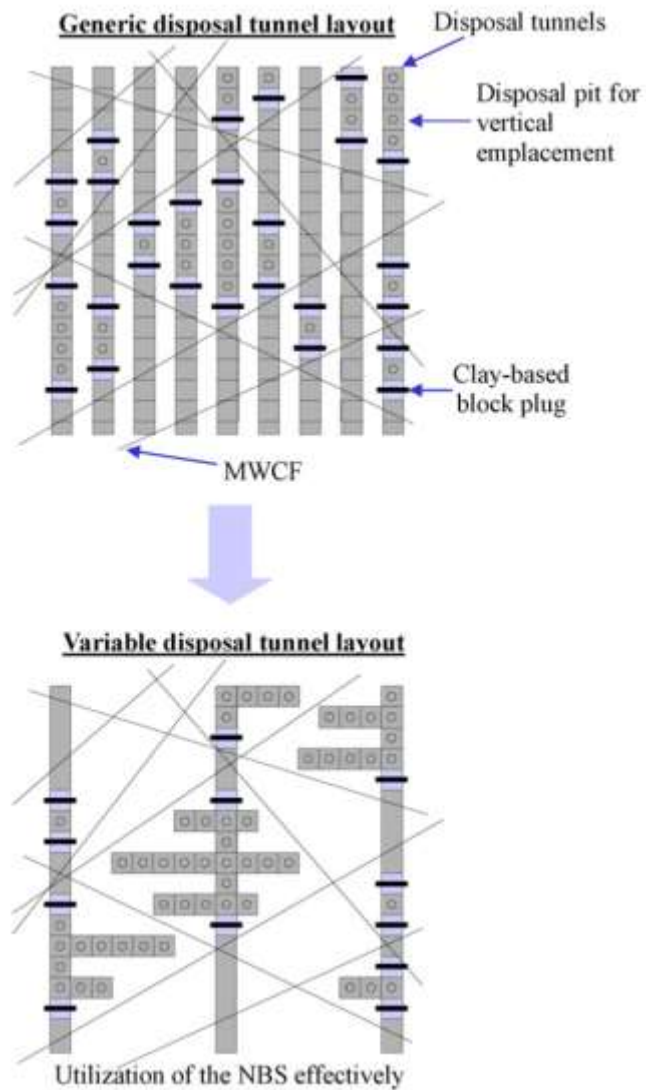


図 7.5.2-8 可変型処分坑道レイアウト適用時のイメージ[11]

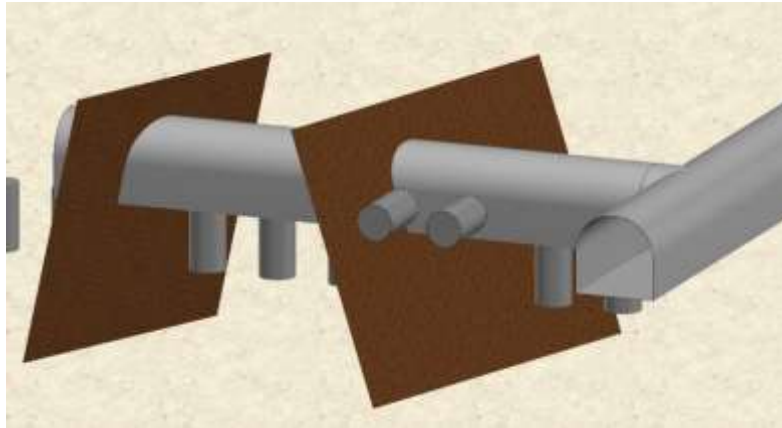


図 7.5.2-9 処分坑道周囲で好ましいエリアを選定し、廃棄体を定置するイメージ

### (3) 斜めプラグの施工

以下には前項で示した「廃棄体定置位置の地質環境に応じたカスタマイズ方法」において重要となるプラグ施工に関する選択肢を記載した。

#### 1) 現状の選択肢の課題

現在、処分坑道の埋戻しにおいては核種の卓越した移行経路になるゆるみ域を遮断するために、図 7.5.2-10 に示すようにプラグ（粘土材料）を施工し、遮断することが考えられている。このプラグは、ゆるみ域のみではなく、トンネル支保のため施工される覆工コンクリートの劣化に対する止水の役割も担っている。

しかし、現在計画されているプラグ形状は、坑道の埋め戻しなど実施工を十分に考慮しておらず、合理的な方策だとは言いがたい。具体的に、①実際の坑道埋戻しは、図 7.5.2-11 のように行われるため現状のプラグを当てはめると、その空間部の処理ができない（つまり土工で約 5m もの鉛直面の施工ができない）。②また、プラグは、ブロックの積上げにより施工することが現状考えられているため、鉛直面の施工は可能であるが、安全面で課題が残されている。更に、③プラグを設置するために、ゆるみ域を高所作業において、凹上に掘削する必要があり、この観点においても安全上、問題があると言える。

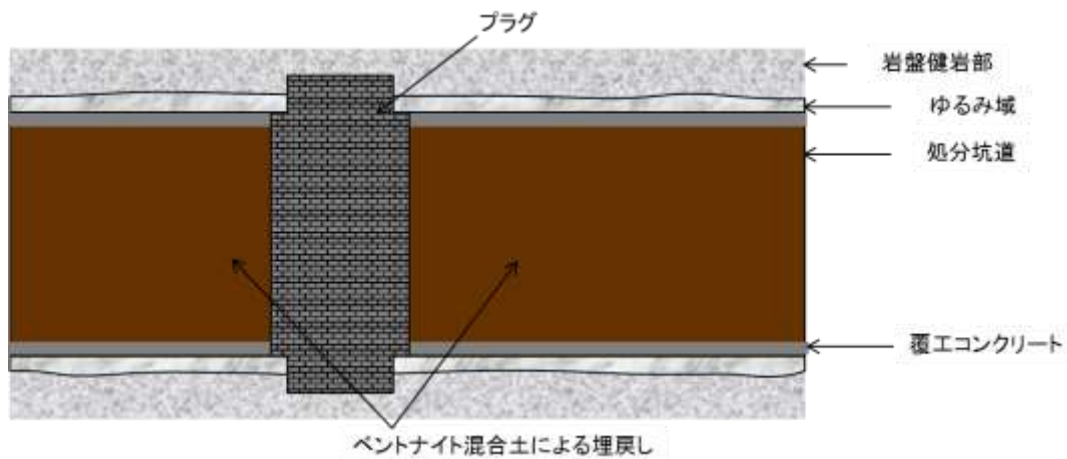


図 7.5.2-10 現状考えられているプラグ形状

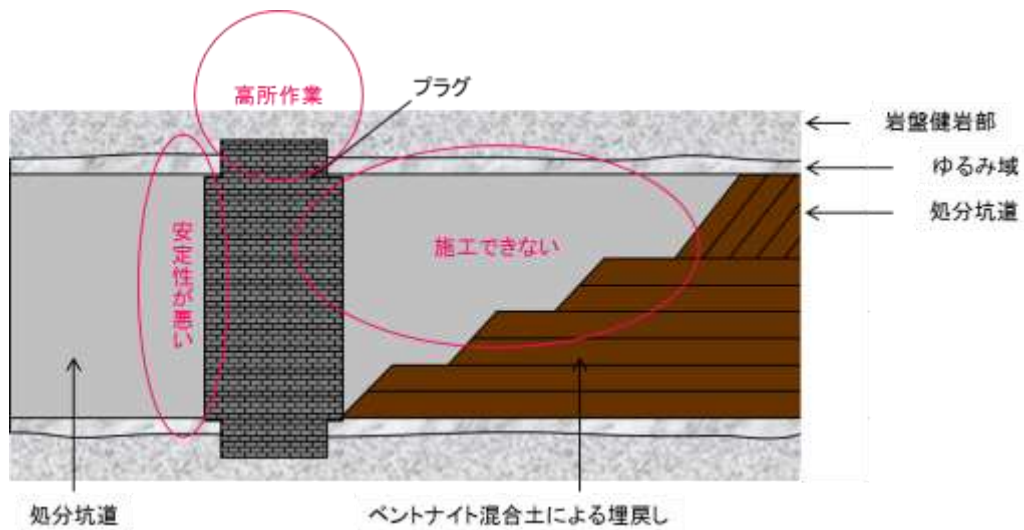


図 7.5.2-11 実際のプラグ施工における課題

## 2) 提案する選択肢

この問題点を解決する手段としては、図 7.5.2-12 及び図 7.5.2-13 に示すように①プラグの形状を実際の埋戻しの施工方法を考慮した形状とすることにより、「実際の施工では処理できない空間部」を無くす。また、②階段状にプラグを施工することにより、「約 5m もの高さの鉛直ブロック積上げ」を無くす。更に、③ベントナイト混合土による階段状の埋め戻し形状を利用し、各段上から施工することにより、「約 5m もの高さを有するトンネル周辺部に凹上の掘削をする不安全（高所）作業」を無くすことである。

従来の選択肢（鉛直プラグ）と提案する選択肢（斜めプラグ）のイメージを図 7.5.2-14 に示す。

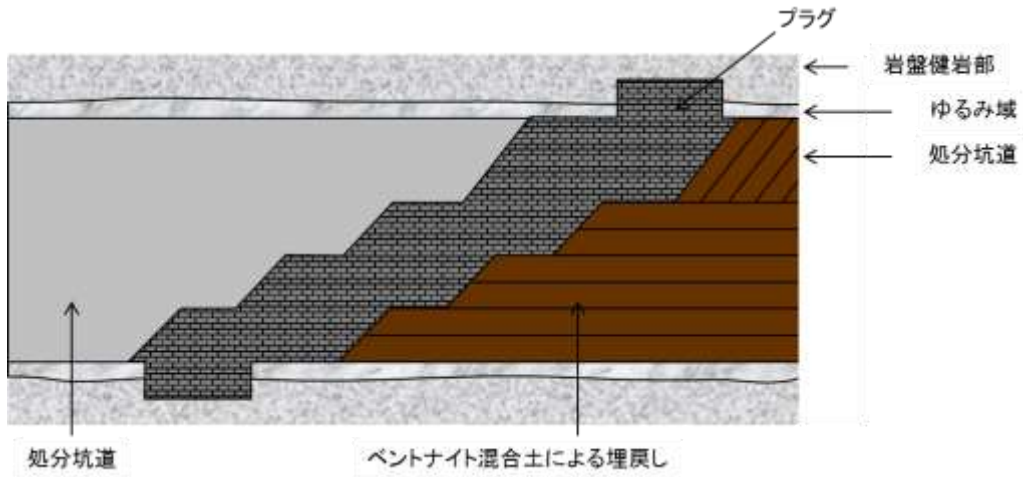


図 7.5.2-12 提案する斜めプラグ

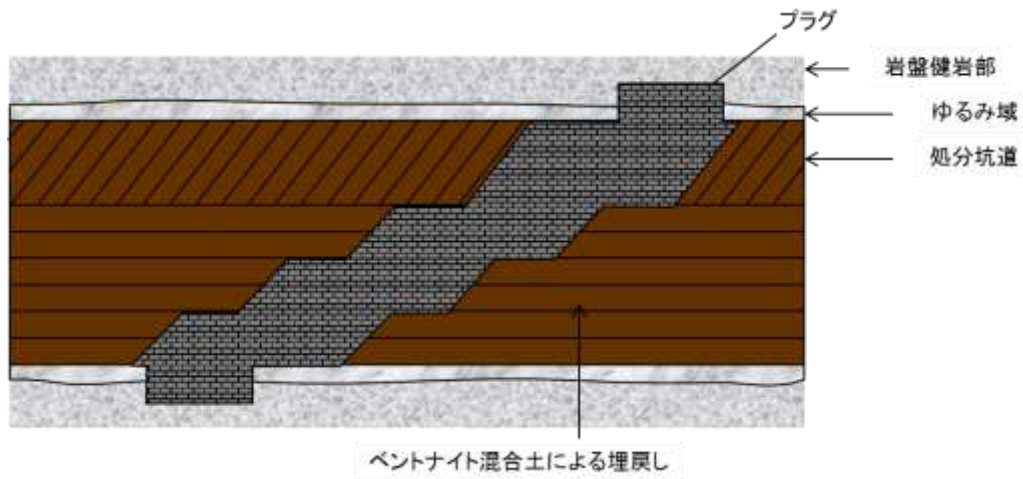


図 7.5.2-13 提案する斜めプラグとその後の坑道埋戻し

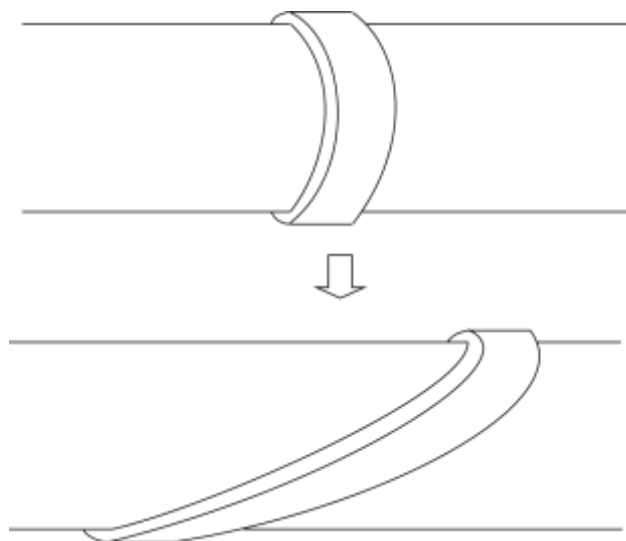


図 7.5.2-14 斜めプラグのイメージ (鉛直プラグとの比較)

### 7.5.3 KBS-3H の概念

横置き定置方式については、わが国では PEM 定置方式の優位性の検討が始まっているが、具体的な設計はされておらず、これから検討することが必要である。検討を進める上で、先行する SKB 社とポシヴァ社の知見を踏まえることは合理的に研究を進めることにつながるため、これを調査した。

SKB 社とポシヴァ社が共同で実現した KBS-3H 概念の開発について、SKB International 社に調査を行った。内容のほとんどは現在のプロジェクト・フェーズである「KBS-3H システム設計」のものであり、最新の情報となっている。添付資料 C にレポートを翻訳したものの全編を示す。

## 第7章 参考文献（調査文献以外）

- [1] 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次取りまとめ総論レポート、1999年11月
- [2] 須山ほか：閉鎖時の意思決定における地層処分モニタリングのあり方に関する検討、原子力バックエンド研究、Vol.17-No.2、2010年12月
- [3] 土ほか：付加的に評価する事項による相対評価の信頼性向上方法に関する検討（その1）、土木学会第61回年次学術講演会、2006年9月。
- [4] 須山ほか：“付加的に評価する事項による相対評価の信頼性向上方法に関する検討（その3）～共通評価指標である「長期安定性」と「経済性」の確からしさの評価の試み～”、土木学会第61回年次学術講演会、2006年9月。
- [5] 土ほか：概要調査地区選定における Evidential Support Logic(証拠に基づく意思決定支援理論)の適用性評価、土木学会第59回年次学術講演会講演概要集、2004年9月。
- [6] 須山ほか：“付加的に評価する事項による相対評価の信頼性向上方法に関する検討（その3）～共通評価指標である「長期安定性」と「経済性」の確からしさの評価の試み～”、土木学会第61回年次学術講演会、2006年9月。
- [7] 経済産業省、“特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（平成27年5月22日閣議決定）”、経済産業省ホームページ
- [8] 原子力規制委員会“廃棄物埋設の放射線防護基準に関する検討チーム”：放射性廃棄物の埋設に係る管理期間終了後の放射線防護のための基準について（案）、資料3-1、2016年7月
- [9] 原子力規制委員会“廃棄物埋設の放射線防護基準に関する検討チーム”：廃棄物の埋設に係る放射線防護基準及び原子力施設のサイト解放基準について（案）、資料5-1、2016年10月
- [10] 三枝博光、瀬野康弘、中間茂雄 他：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第1段階）研究成果報告書、JAEA-Research 2007-043、(独)日本原子力研究開発機構、2007年3月
- [11] Y. Suyama, et al. : Study of an optimization approach for a disposal tunnel layout, taking into account the geological environment with spatially heterogeneous characteristics, Nuclear Engineering and Design, 239 (2009) 1693–1698, 2009年



<添付資料 A>

論文リスト

No.	PDF-No.	関連	発行年	和文標題	英文標題	著者名	資料名	巻号ページ(発行年月)	要約	キーワード
1	005	無	1955	れき混入ベントナイト混合土の含水比が透水係数に及ぼす影響	Effect of Water Content on Permeability of Bentonite/Sand Mixture with Gravel.	平和男, 深沢栄造, 田中俊行, 須山泰宏 (鹿島建設 技研)	土質工学会研究発表会発表講演集	Vol.30th, No.3-3, Page.1839-1840 (1995.05)	一般廃棄物処分施設等で要求される高い遮水性を有する人工遮水材料の開発を目的として、ベントナイトの膨潤性を利用したれき混入ベントナイト混合土を取り上げ調査した。含水比が透水係数に及ぼす影響について検討し、れき混入ベントナイト混合土の透水係数は、一般土質材料と同様含水比の影響を受け、最適含水比よりも湿潤側で最小となることなどが分かった	難透水性, 透水特性, 締固め特性, 粘土
2	003	無	1995	礫混入粘土系材料の透水係数について		田中 俊行, 深沢 栄造, 平和 男, 須山 泰宏(鹿島技術研究所)	土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集	22, pp.0376-0377 (1995.3)	一般廃棄物処分施設や放射性廃棄物埋設施設では、雨水・地下水の流入や廃棄物内の有害物質の漏洩を防ぐために、砂に粘土を混合して締固めたライナーやベントナイト混合土等の難透水性の材料で表面および上部を覆うことが一般的に考えられている。(1)~(2)また、一般の土質材料では、間隙が小さくなると、透水係数が低くなる傾向にあることから、使用する材料を高い密度に締固めることが重要である。 本研究では、難透水性を確保するために、礫材を混合して高い密度に締固めた新しい材料(礫+砂+粘土)を提案し、基礎的な特性について検討した(3)。本報では、透水	ベントナイト, れき, 透水係数, 混合, 地中処分, 止水
3	004	無	1995	れき混入ベントナイト混合土のれき混入率が透水係数に及ぼす影響	Effect of Gravel on Permeability of Bentonite/Sand Mixture with Gravel.	田中俊行, 深沢栄造, 平和男, 須山泰宏 (鹿島建設 技研)	土質工学会研究発表会発表講演集	Vol.30th, No.3-3, Page.1837-1838 (1995.05)	一般廃棄物処分施設など高い遮水性が要求される構造物で難透水性を確保するため、れき材を混合して高い密度に締固めたれき混入ベントナイト混合土(れき+砂+ベントナイト)を提案し基礎的な特性について考えた。ベントナイト混入率を一定にしてれき混入率が透水係数に及ぼす影響について検討した。あるれき混入率を越えると透水係数が大きくなることなどが示された	れき, ベントナイト, 含水量, 透水係数, 混合
4	006	無	1995	れき・粘土混合土の締固め特性・透水特性について	Compaction and permeability properties of gravel/clay mix soil.	田中俊行, 深沢栄造, 平和男, 須山泰宏 (鹿島建設 技研)	土木学会年次学術講演会講演概要集 第3部	Vol.50th, No.B, Page.1478-1479 (1995.09)	フィルダムや河川堤防等の構造物の遮水材料は、長期的な安全性および遮水性を維持することが重要である。また、一般廃棄物処分施設や放射性廃棄物埋設施設では、雨水・地下水の流入や廃棄物内の有害物質の漏洩を防ぐために、砂に粘土を混合した難透水性の材料で表面または下部を被覆することが考えられている(1)。 本研究では、遮水性を確保するために、礫材を混合して高い密度に締固めた礫と砂と粘土の混合材料の基礎的な特性について検討しており(2)、礫を50~70%混入すれば、礫を混入しない場合と比較して、高い締固め密度や低い透水係数が得られることを確認した(3)。本報では、礫混入率を一定として、粘土材料の種類と粘土の混入率を変化させた場合の締固め特性や透水特性について検討した	
5	007	無	1995	れき混入ベントナイト混合土中のベントナイト量の簡易測定法	Simple measuring method of bentonite quantity in gravel and bentonite mixed soil.	須山泰宏, 深沢栄造, 平和男, 田中俊行 (鹿島建設 技研)	土木学会年次学術講演会講演概要集 第6部	Vol.50th, Page.332-333 (1995.09)	礫混入ベントナイト混合土(礫+砂+ベントナイト)は、ベントナイトの膨潤特性と礫の骨格形成を利用することにより、高い遮水性と大きな地盤支持力を合わせつつ人口地盤材料であることが、室内実験および現場施工実験において確認されている。(1)(2) 礫混入ベントナイト混合土を、例えば放射性廃棄物埋設施設の難透水性の材料として用いる場合は、製造時及び施工時においては、一般土工事以上の十分な品質管理が要求される。特に、製造時において、高い遮水性を得るために混入しているベントナイトの均一性の確保が重要な課題となっている。ベントナイト混合土中のベントナイト量の測定方法として、メチレンブルー吸着量試験があるが、礫混入ベントナイト混合土においては礫を破砕する作業に手間がかかるため、簡便な試験方法の開発が望まれている。 そこで、本研究においては、ベントナイト溶液の濃度と粘性の關係に着目し、礫混入ベントナイト混合土に加水・攪拌してベントナイト溶液を作り、その粘性から、ベントナイト量を検定する簡易方法を検討している。ここでは、B型粘度計を用いた測定結果について報告する。(はじめに)	
6	008	無	1995	人工地盤構築材料の開発(その3)れき混入ベントナイト混合土の透水特性	Development of Back-Fill Materials. (Part 3). Permeability of Bentonite-Sand Mixture with Gravel.	田中俊行, 深沢栄造, 平和男, 須山泰宏 (鹿島建設 技研)	鹿島技術研究所年報	Vol.43, Page.203-208 (1995.12)	高い遮水性を有する人工地盤材料を開発することを目的として、れき材を混合して高い密度に締固めたれき混入ベントナイト混合土(れき+砂+ベントナイト+水)の基礎的な特性について検討している。その透水特性について調べた結果、次のようなことが分かった。1)れきと砂にベントナイトを混入することによって、透水係数を小さくすることができる。しかし、ベントナイト混入率が約12%を超えると透水係数の変化の度合いが小さくなる。2)ベントナイト混入率が一定の場合、れき混入率が増加すると密度が大きくなり、透水係数を小さくすることができる。しかし、れき混入率が60-70%を超えると透水係数は大きくなる。3)れき混入ベントナイト混合土の透水係数は、一般土質材料と同様、含水比の影響を受け、最適含水比よりも乾燥側で最大値、湿潤側で最小値をとる。4)ベントナイトを含む混合材料の透水係数は、有効ベントナイト湿潤密度(れきと砂を除外した部分の湿潤密度)によって統一的に評価できる。(著者抄録)	人工土壌, ベントナイト, 止水, 透水係数, 含水量, 廃棄物処理施設, 締固め, 土壌
7	009	無	1996	れき混りベントナイト混合土の配合が透水係数に与える影響	Permeability of Laboratory Specimens of Bentonite-Sand Mixture with Gravel.	松田広継, 広陽二, 矢田信浩 (九州電力), 山本正史, 藪内耕一 (原子力環境整備セ), 須山泰宏, 田中俊行 (鹿島建設 技研)	地盤工学会研究発表会発表講演集	Vol.31st, No.2-2, Page.2169-2170 (1996.05)	れき混りベントナイト混合土の透水性に及ぼすれきの最大粒径、れき配合率及びベントナイト配合率の影響を検討し、れきの最大粒径は20mm程度、れき配合率は50-60%程度にすれば透水係数を最も小さくすることができ、ベントナイト配合率が12.5%であれば、目標透水係数(室内試験で $k=1 \times 10^{-9}$ cm/s以下)を満足することがわかった	透水係数, ベントナイト, れき, 粒径, 含水量, 砕石, 砂, 透水性, 締固め, 混合, 人工バリア
8	010	無	1996	れき混りベントナイト混合土の強度特性	Strength characteristic of composite soil of mixed bentonite with gravel.	藪内耕一, 山本正史 (原子力環境整備セ), 松田広継, 広陽二 (九州電力), 須山泰宏 (鹿島建設 技研)	土木学会年次学術講演会講演概要集 第3部	Vol.51st, No.B, Page.750-751 (1996.09)	低レベル放射性廃棄物埋設施設周囲の難透水性覆土材料の一つとして、礫混りベントナイト混合土が注目されており、少ないベントナイト量で低い透水性を有することがわかってきている。(1)しかし、礫混りベントナイト混合土の強度特性については研究例も少なく、その特性を把握する必要がある。本研究は、室内試験により礫混りベントナイト混合土の強度特性に及ぼす礫の最大粒径、ベントナイト配合率及び含水比の影響を調べるとともに、室内試験で透水係数 $k=1 \times 10^{-9}$ cm/sec程度を示す配合の礫混りベントナイト混合土(1)の強度特性についても調べたので、その結果を報告する。(はじめに)	
9	012	無	1997	振動ローラで締め固めたれき混りベントナイト混合土の基本特性	Property of compacted bentonite-sand mixture incorporating gravel by vibration roller.	秦正文, 山田俊一, 矢田信浩 (九州電力), 平田征弥, 藪内耕一 (原子力環境整備セ), 平和男, 須山泰宏 (鹿島建設 技研)	日本原子力学会1997年秋の大会予稿集	Vol.1997, 第3分冊, Page.672 (1997.09)	低レベル放射性廃棄物埋設施設周囲には、バリア材として難透水性覆土材料の施工が必要とされており、筆者らは、候補材料の一つであるれき混りベントナイト混合土(以下、混合土と称す)の特性を明らかにするために検討を行っている。本報告では、現場施工試験において、混合土の含水比の違いが締固め特性や透水性に与える影響について検討したので、その結果について報告する。(著者抄録)	

No.	PDF-No.	関連	発行年	和文標題	英文標題	著者名	資料名	巻号ページ(発行年月)	要約	キーワード
10	207	有	1999	「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ」第IV章 処分場の設計に関する検討 4.1人工バリアの設計・製作 4.1.2緩衝材 4.1.2.2緩衝材の設計		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技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ分冊2 地層処分の工学技術(1999)」、核燃料サイクル開発機構	P.IV-143~P.IV-156	核燃料サイクル開発機構が実施した処分技術の研究成果のうち、緩衝材の設計に関する成果をまとめたもの	緩衝材、再冠水、膨潤、密度分布
11	208	有	1999	「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ」第IV章 処分場の設計に関する検討 4.1人工バリアの設計・製作 4.1.2緩衝材 4.1.2.3緩衝材の製作・施工技術に関する検討		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技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ分冊2 地層処分の工学技術(1999)」、核燃料サイクル開発機構	P.IV-157~P.IV-198	核燃料サイクル開発機構が実施した処分技術の研究成果のうち、緩衝材の製作・施工技術に関する成果をまとめたもの	
12	021	有	2004	緩衝材の再冠水挙動評価(1)ベントナイト系人工バリアの再冠水時の挙動および品質評価	Studies on mechanical behavior of bentonite for development of elasto-plastic constitutive model, DisTec 2004, pp.498-507 (2004).	鈴木 圭、朝野英一(原環センター) 小林一三(鹿島建設)	日本原子力学会2011年秋の大会	B31 p86	人工バリア材料のうち緩衝材の過渡的段階(地下水の再冠水)を考慮した品質評価を行うため、材料特性や施工方式等を踏まえた緩衝材の浸潤試験を実施した。これまで緩衝材の施工時の密度分布や隙間があっても、飽和後には均質化するという仮定に基づいて検討が行われてきたが、乾燥密度の異なるベントナイトが混在する場合には再冠水後も密度差が残り、応力履歴の差によっても密度差が生じることが力学的にも説明できることを報告する。	:高レベル放射性廃棄物処分、ベントナイト、パイピング、エロージョン、密度差、設計・施工仕様
13	168	有	2005	飽和過程におけるベントナイトの膨潤挙動に関する実験的研究		藤崎勝利、北本幸義、小林一三、中島誠門、田中俊行、笹倉 剛(鹿島建設)	土木学会第60回年次学術講演会(平成17年9月)	3-058 p115-116	放射性廃棄物処分施設で検討されている多重バリア構造において、ベントナイト層に地下水が接触した場合の膨潤圧が、隣接して設置される可能性のあるセメント系の構造体を与える影響を検討した例は少ない。このため、本研究では、建設・操業中、および再冠水時のベントナイト層の膨潤挙動が、セメント系の構造体を与える影響の評価手法を開発することを目的として実験的検討を行った。本文では、ベントナイトの締め時の含水比と膨潤圧の関係、およびベントナイトの膨潤圧が不均一になる場合をシ	パイピング、エロージョン、ベントナイト、緩衝材、再冠水
14	169	有	2005	吹付け工法によるベントナイト系人工バリアの構築		小林一三、笹倉 剛、田中俊行、中島誠門、戸井田 克、上本勝広(鹿島建設)	土木学会第60回年次学術講演会(平成17年9月)	3-064 p127-128	放射性廃棄物処分施設におけるベントナイト系人工バリア層には高い止水性能が要求されているが、処分空洞という狭隘な場所での施工となるために大型重機を使用することができないことが想定される。このために、ベントナイト系人工バリア層のうち、特に狭隘な施工環境となる部位に関しては、その構築方法として、現場締め、ベントナイトブロックを設置する方法などの様々な施工法が検討されている。本報では、ベントナイト系人工バリアの構築方法として、狭隘箇所での施工性が高いと考えられる湿式吹付け工法について検討した結果を報告する。	高レベル放射性廃棄物、地層処分、ベントナイト、再冠水、浸潤
15	170	有	2005	冷却ベントナイトと微粒子氷による含水比調整法		小林一三、笹倉 剛、田中俊行、中島誠門、戸井田 克、上本勝広(鹿島建設)	土木学会第60回年次学術講演会(平成17年9月)	3-060 p119-120	放射性廃棄物処分施設におけるベントナイト系人工バリア層は、原鉱ベントナイトなどを締め固めによって構築することを基本として様々な検討がなされている。この締め固め工法ではベントナイトの含水比が品質管理の観点から重要となるが、これまでベントナイトの含水比調整方法は十分に検討されていなかった。従来の含水比調整方法としては、原鉱ベントナイトに対して加水して造粒機やミキサーを用いて均一になるまで混合する方法があるが、①ベントナイトが大粒径になる、②均一に攪拌するまでに時間がかかる、③少量ずつパッチ式で混合するか、非常に強力なミキサーを使用する必要がある、などの問題点があった。そこで本報では、冷却したベントナイトと微粒子に粉碎した氷を、低温環境下で粉体状態で混合することで簡便に含水比調整を行う方法を検討したので報告する。	bentonite buffer, geomechanics, piping, erosion, self-sealing, water inflow.
16	163	有	2006	飽和過程におけるベントナイトの膨潤挙動に関する実験的研究(その2)		藤崎勝利、小林一三、中島誠門、北本幸義(鹿島建設)	土木学会第61回年次学術講演会(平成18年9月)	CS05-073 p351-352	筆者らは、放射性廃棄物処分施設で検討されている多重バリア構造において、建設・操業中、および再冠水時のベントナイト層の膨潤挙動が、セメント系の構造体を与える影響の評価手法を開発することを目的として実験的研究を行なっている。これまでに、ベントナイトの締め時の含水比と膨潤圧の関係、および簡易な土槽実験結果について報告している1)。本文では、これらに引き続いて、ベントナイトの締め曲線と膨潤圧の関係、およびベントナイト層が不均一に膨潤した場合を模擬した一次元土槽実験結果について報告する。	割れ目ネットワークモデル、浸透流解析、処分孔湧水、止水対策
17	164	有	2006	凍結混合方法によるベントナイト系人工バリア材料の含水比調整法		小林一三、戸井田 克、田中俊行、中島誠門、佐藤竜郎(鹿島建設)	土木学会第61回年次学術講演会(平成18年9月)	CS05-070 p345-346	放射性廃棄物処分施設におけるベントナイト系人工バリア層は、原鉱ベントナイトなどを締め固めることによって構築することを基本として様々な検討がなされている。この締め固め工法ではベントナイトの含水比が品質管理の観点から重要となるが、これまでベントナイトの含水比調整方法は十分に検討されていなかった。そこで既往の研究1)では、氷点下で冷却したベントナイトと微粒子に粉碎した氷を、低温環境下で粉体状態で混合することで簡便に含水比調整が可能であることを示した。本報では、その混合プラントを具体化したので報告する。	高レベル放射性廃棄物地層処分、再冠水、ベントナイト、流出、エロージョン



No.	PDF-No.	関連	発行年	和文標題	英文標題	著者名	資料名	巻号ページ/発行年月	要約	キーワード
18	165	有	2006	吹付け工法による高密度ベントナイトの施工試験－施工条件の検討－		中島誠門, 小林一三, 田中俊行, 戸井田 克(鹿島建設)	土木学会第61回年次学術講演会(平成18年9月)	CS05-055 p315-316	低レベル放射性廃棄物のうち次期埋設施設やTRU 廃棄物処分施設では、廃棄体の入った構造躯体を緩衝材(ベントナイト)で覆うバリア概念が想定されている。この概念において緩衝材には高い止水性が期待されているため高密度に施工することが必要になる。例えば、緩衝材の透水係数を $1 \times 10^{-12}$ m/sec 以下にするためには、ベントナイト単体で乾燥密度1.6Mg/m <sup>3</sup> 以上に施工する必要がある。現在、この緩衝材の施工方法として振動締固めやベントナイトブロック等の施工方法が検討されており、特に狭隙部における緩衝材の構築は、施工面・品質面共に難易度が高いと考えられる。そこで、狭隙部においてベントナイトを高密度に施工する方法として吹付け工法について検討した。本報では、これまでの試験結果1)を基に、目標とする乾燥密度ならびにリバウンド率で吹付けけるための施工条件を検討した結果を報告する。	締固め、飽和度、転圧試験、飽和度
19	166	有	2006	吹付け工法によるベントナイト系人工バリアの施工試験		中島誠門, 小林一三, 田中俊行, 戸井田 克(鹿島建設)	第41回地盤工学研究発表会2006年7月	1229 p2457-2458	低レベル放射性廃棄物のうち次期埋設施設やTRU廃棄物処分施設では、廃棄体の入った構造躯体を緩衝材(ベントナイト)で覆うバリア概念が想定されている。この概念において緩衝材には高い止水性が期待されており、このため高密度に施工することが必要になる。例えば、ベントナイトの透水係数を $1 \times 10^{-12}$ m/sec以下にするためには、ベントナイト単体で乾燥密度1.6Mg/m <sup>3</sup> 以上に締固める必要がある。現在、この緩衝材の施工方法として振動締固めやベントナイトブロックを用いる方法等が検討されているが1)、特に狭隙部における緩衝材の構築は、施工面・品質面共に難易度が高いと考えられる。	放射性廃棄物、地層処分、ベントナイト系人工バリア、止水性能、比表面積、透水係数
20	167	有	2006	吹付け工法による高密度ベントナイト施工試験	Construction Tests of High Density Bentonite Barriers by Means of Spraying Methods	田中俊行, 小林一三, 中島誠門, 戸井田 克(鹿島建設)	日本原子力学会2006年春の年会	B28 p28	低レベル放射性廃棄物やTRU放射性廃棄物処分施設の狭隙部の緩衝材の施工を対象として、ベントナイト吹付け工法による現場試験を実施した。空気圧縮機の圧力や吐出流量を制御し、最適な形状のノズルを使用することで、透水係数10-13m/secオーダが得られる乾燥密度1.6Mg/m <sup>3</sup> 以上を達成することができた。	締固め、飽和度、転圧試験
21	148	有	2007	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		小林一三, 戸井田 克, 笹倉 剛(鹿島建設) 太田秀樹(東工大)	土木学会論文集C	Vol.63No.4, 1065-1078, 2007.12	現行の放射性廃棄物地層処分概念では、処分施設は廃棄体を取り囲むベントナイト系人工バリア、セメント系人工バリアと処分坑道を囲む岩盤などの天然バリアから構成される。現行の地層処分概念の成立基盤を担保するためには、ベントナイト系人工バリアに高い止水性能が求められる。ベントナイトは、このような重要な役割を担っているため、これまで数多くの様々な室内要素試験に供されてきたが、これらの試験結果を力学に基づいて統一的にまとめた例は少ない。そこで本論文では、この締固めベントナイトの圧縮・膨潤挙動を $e$ - $\ln \sigma_v'$ 平面における等含水比線と等飽和度線を用いて地盤力学に基づく統一的な解釈を行った。	
22	150	有	2007		Development of Construction Methods of the bentonite engineered barrier by the high-density shotclay system	Ichizo KOBAYASHI, Masaru TOIDA, Makoto NAKAJIMA, Toshiyuki TANAKA (Kajima) Kenji TERADA (RWMC) Katsumi NONAKA, Junichi YABE (Plibrico Japan)	Preprints of contributions to the workshop on Long-term performance of smectic clays embedding canisters with highly radioactive wastes, 2007.11	pp52-59	In the radioactive waste geological disposal concept, high impermeability with a bentonite engineered barrier is expected. However, the conventional construction methods, such as the in-situ compaction method and bentonite block laying method, will produce density distribution and clearances in the bentonite engineered barrier. The effects of the density distribution and a clearance on the long-term high impermeability of the bentonite engineered barrier will be not small. Therefore, in this study, high-density shotclay system of bentonite was developed as a construction method of the bentonite engineered barrier which can be constructed uniformly without a clearance even in a narrow space.	地層処分施設、湧水、緩衝材、吹付け施工
23	151	有	2007	圧縮成型ベントナイトの透水係数に及ぼすNaNO <sub>3</sub> 濃度の影響	Effect of the Concentration of NaNO <sub>3</sub> Solution on Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite	三原守弘(原子力機構) 小林一三(鹿島建設)	JAEA-Research 2007-020	p1-45	使用済み燃料の際槽の過程で発生するTRU廃棄物の中には、硝酸塩を多量に含む廃棄物も存在する。この廃棄物の地下深部への処分を想定した場合、処分施設の構成材料として、核種の漏洩を遅延させるために、低透水性の圧縮成型ベントナイトの使用が考えられる。廃棄物中の硝酸塩(主として硝酸ナトリウム)は、地下水に対して可溶性なため処分施設周辺の地下水が高イオン濃度となる可能性があり、硝酸ナトリ	高レベル放射性廃棄物地層処分、ベントナイト、再冠水、パイピング、エロージョン
24	152	有	2007		MODELLING FOR THE LONG-TERM MECHANICAL AND HYDRAULIC BEHAVIOR OF BENTONITE-BASED MATERIALS CONSIDERING CHEMICAL TRANSITIONS	F. Sahara, T. Murakami, I. Kobayashi (Kajima) M. Mihara, T. Ohi (JAEA)	INTERNATIONAL MEETING, SEPTEMBER 17...18, 2007, LILLE, FRANCE CLAYS IN NATURAL & ENGINEERED BARRIERS	Page 555-556	In the current disposal concept of TRU wastes in Japan, wastes are emplaced in large underground cavities utilizing cementitious materials as fillers and structural materials, surrounded by a bentonite buffer. The performance assessment for this concept indicates that soluble and non-sorptive nuclides, I-129 and C-14, are predominant in dose evaluation and it is pointed out that groundwater flow in the Near-Field has significant effect on the migration of these nuclides. Therefore, to realize more reliable evaluation of the performance of TRU wastes	:パイピング、エロージョン、ベントナイト、緩衝材、再冠水
25	153	無	2007		DEVELOPMENT OF WATER CONTENT ADJUST METHOD BY MIXING POWDERED-ICE AND CHILLED-BENTONITE: APPLICATION TO THE CONSTRUCTION OF BENTONITE ENGINEERED BARRIERS BY SHOTCLAY METHOD	I. Kobayashi, M. Toida, T. Sasakura (Kajima)	INTERNATIONAL MEETING, SEPTEMBER 17...18, 2007, LILLE, FRANCE CLAYS IN NATURAL & ENGINEERED BARRIERS FOR RADIOACTIVE WASTE CONFINEMENT	Page 213-214	In the construction of the bentonite engineered barriers of geological disposal facilities, the water content of the bentonite materials is one of the most important controlled parameter in terms of construction management. The water content adjustment is the simple operation which is the mixing of water and bentonite materials. However, the mixing water with bentonite uniformly is not easy operations. There are many difficult problems to be solved in the operation, such as enlargement of the grain size during the mixing, sticking to a mixer strongly and uneven distribution of water content. The enlargement of the grain size of the bentonite materials due to the water content adjustment, particularly, was a serious problem in the development of the construction method of bentonite engineered barriers by spraying method (called shotclay method). As shown in the Figure 1, the developed shotclay system achieved	放射性廃棄物、余裕深度処分施設、緩衝材、吹付け施工
26	154	有	2007	覆土現場施工性試験(その4)－施工品質管理のための迅速な止水性能評価方法－		小椋司, 鳥山進, 鳴海恵一郎, 工藤直洋(日本原燃) 小林一三, 戸井田 克, 河津幸治(鹿島建設) 藤原斉都(大成建設) 中島 均(清水建設) 大西利満(日本国土開発)	土木学会第62回年次学術講演会(平成19年9月)	CS5-031 p221-222	放射性廃棄物の地層処分施設におけるベントナイト系人工バリアには高い止水性能が期待されており、その施工にあたっては、何らかの方法によって品質管理(確認)を行うことが予想される。しかしながら、ベントナイト系人工バリアの難透水性から、通常の透水試験による施工品質管理は、長時間を要するために現実的ではなく、乾燥密度などの透水係数と相関がよい代替パラメータを取得する方法などの様々な品質管理方法が検討されてきた。ここでは、ベントナイト系人工バリアの施工品質管理に資する技術として、低レベル放射性廃棄物コンクリートビッド処分の覆土現場施工性試験1)における難透水性層に対して計測精度を落とすことなく迅速に透水係数を取得する方法を検討したので報告する。	放射性廃棄物、余裕深度処分施設、緩衝材、吹付け施工

No.	PDF-No.	関連	発行年	和文標題	英文標題	著者名	資料名	巻号ページ(発行年月)	要約	キーワード
27	155	有	2007	高密度ベントナイト吹付け工法の開発(その1)－高品質なベントナイト構築のための材料供給方法の検討－		中島誠門, 田中俊行, 小林一三, 戸井田克, 福田勝美, 佐藤竜郎(鹿島建設) 野中克美, 矢部順一, 神津圭輔(日本プライブリコ)	土木学会第62回年次学術講演会(平成19年9月)	CS5-009 p177-178	余裕深度処分施設施設やTRU 廃棄物処分施設のベントナイト系人工バリアのうち、上部・側部緩衝材やプラグ等の狭隘部施工に適用することを目的として、ベントナイト吹付け工法の開発に取り組んでおり、既に1×10-12 m/sec以下の難透水性が得られる1.60Mg/m3以上の有効ベントナイト乾燥密度を得ることに成功している1)。ここでは、より高品質なベントナイト系人工バリアの構築を目的として、密度分布を均一にす	高レベル放射性廃棄物地層処分、ベントナイト、再冠水、比抵抗分布、飽和度分布
28	156	有	2007	高密度ベントナイト吹付け工法の開発(その2)－密度のばらつきと施工方法の検討－		戸井田克, 田中俊行, 中島誠門, 小林一三, 福田勝美, 佐藤竜郎(鹿島建設) 野中克美, 矢部順一, 神津圭輔(日本プライブリコ)	土木学会第62回年次学術講演会(平成19年9月)	CS5-010 p179-180	余裕深度処分施設施設やTRU 廃棄物処分施設のベントナイト系人工バリアのうち、上部・側部緩衝材やプラグ等の狭隘部施工に適用することを目的として、筆者らはベントナイト吹付け工法の開発を実施中である。これまで吹付けで実現が困難であった有効ベントナイト乾燥密度1.6Mg/m3以上の高密度を達成し、安定な施工をするために不可欠な材料供給方法について検討した1)。そして、この工法を実施工に供するために、吹付けによる施工の具体的な施工方法について検討する必要がある。従って、	ベントナイト、吹付け工法、余裕深度処分、乾燥密度、施工品質管理
29	158	有	2007	難透水性層の施工品質管理のための迅速な透水試験方法	Quick permeability tests for construction quality confirmation of a high resistive layer of	小林一三, 戸井田 克, 河津幸治(鹿島建設) 小椋 司, 鳥山 進, 鳴海恵一郎, 工藤直洋(日本原燃)	日本原子力学会2007年春の年会	146 p426	放射性廃棄物地層処分施設におけるベントナイト系人工バリアの施工品質管理のための、迅速、且つ高精度の透水試験方法を開発した。従来法の定圧式透水試験法と比較して、1/3～1/4程度の試験時間で試験が行えることが明らかとなった。	吹付け、埋め戻し、貧配合ベントナイト、止水性能、LLW余裕深度処分
30	159	有	2007	フローポンプ式透水試験法のバリア材料への適用(2)	Application of flow pump permeability tests to barrier materials (2)	瀬尾昭治, 小林一三, 戸井田 克, 横田泰宏(鹿島建設) 佐々木 泰(日本原燃)	日本原子力学会2007年春の年会	113 p393	従来式のフローポンプ式透水試験装置を改良し、最長1,000mmのボーリングコアを対象として超低流量・低差圧条件下においても測定可能な高精度透水試験装置を開発した。	高レベル放射性廃棄物処分、緩衝材、再冠水、施工法
31	160	有	2007	吹付け工法によるHLW・TRU 地層処分施設の緩衝材の構築	Construction of the buffer material in the HLW/TRU geological disposal facility by means of shotclay methods	中島誠門, 小林一三, 田中俊行, 戸井田 克(鹿島建設) 神津圭輔, 矢部順一, 野中克美(日本プライブリコ)	日本原子力学会2007年春の年会	145 p425	TRU・高レベル放射性廃棄物処分施設の緩衝材の構築方法として吹付け工法の適用性を検討した。ケイ砂混合率および含水比をパラメータとした粉体ベントナイトの吹付け試験を行った。検討の結果、吹付け工法によって、高乾燥密度で密度のばらつきが小さい均一な緩衝材を構築できることが明らかとなった。	緩衝材、パイピング、エロージョン、自己修復機能
32	142	有	2008	地下空洞型処分施設性能確認試験における吹付け工法による緩衝材施工の検討		小林一三, 戸井田 克, 中島誠門, 田中俊行, 福田勝美(鹿島建設) 野中克美, 神津圭輔(日本プライブリコ) 寺田賢二, 松村勝秀, 大沼和弘(原環センター)	土木学会第63回年次学術講演会(平成20年9月)	CS05-07 p181-182	地下空洞型処分施設性能確認試験は、地下空洞型処分施設の実規模の試験体を構築し、施設の建設に係わる施工技術、初期品質など、実際に施工した試験体の総合的な品質の確認を行うものである。これにより、地下空洞型処分施設が想定される発電所廃棄物等の地下空洞型処分の安全確保に係わる基盤技術の確立に反映することを目的としている。 ここでは、側部・上部緩衝材や埋戻し材など、現場締固めが難しいと考えられる箇所の施工法として開発した吹付けによる高密度緩衝材の構築(Shotclay)工法を底部緩衝材(図-1 参照)で施工した結果を述べる。	bentonite/ montmorillonite/ specific surface/ swelling pressure/
33	143	有	2008	地下空洞型処分施設性能確認試験における凍結混合方式による含水比調整方法の検討		中島誠門, 戸井田 克, 小林一三, 田中俊行, 福田勝美(鹿島建設) 寺田賢二, 松村勝秀, 大沼和弘(原環センター)	土木学会第63回年次学術講演会(平成20年9月)	CS05-06 p179-180	地下空洞型処分施設性能確認試験は、地下空洞型処分施設の実規模の試験体を構築し、実際に施工した試験体の総合的な品質の確認を行うものである。この中で、ベントナイト系人工バリアの施工にあたっては、使用されるベントナイト材料の含水比が重要な施工管理項目となっている。所定の品質を効率的に得るためには、事前に材料の含水比を精度よく調整することが必要である。そこで本報告では、底部緩衝材で実施した吹付けによる施工において凍結混合方式の含水比調整方法を適用した。	緩衝材、再冠水、膨潤、密度分布、吹付け工法
34	145	有	2008	飽和過程におけるベントナイトの弾性波速度に関する実験的検討	Experimental study on seismic velocity of the bentonite in saturation process	戸井田 克, 中島誠門, 小林一三, 田中真弓(鹿島建設)	日本原子力学会2008年春の年会	13 p406	飽和過程におけるベントナイトの弾性波速度に関する実験的検討として、密度をパラメータとした複数のベントナイト供試体を作製し、各条件における弾性波速度測定を行うとともに、反射波観測の基礎実験を実施したので、その結果について報告する。	放射性廃棄物、地下空洞型処分、緩衝材、再冠水、浸潤速度、比抵抗



No.	PDF-No.	関連	発行年	和文標題	英文標題	著者名	資料名	巻号ページ(発行年月)	要約	キーワード
35	146	有	2008	高レベル放射性廃棄物地層処分の遠隔ハンドリング・定置技術の開発(6)緩衝材の施工品質管理方法の検討(その1)緩衝材の密度計測について	Development of Remote Handling and Emplacement Technologies at HLW Repository - (6) Studies on Construction Quality Control Method of Buffer Material (I) Density Measurement of Buffer Materials	戸栗智仁、朝野英一(原環センター) 小林一三、戸井田 克、中嶋誠門(鹿島建設)	日本原子力学会2008年春の年会	155 p458	高レベル放射性廃棄物(HLW)地層処分において遠隔操作技術によって構築される緩衝材の施工品質管理を目的として、緩衝材の要件である透水性能や力学性能と相関を持つ密度や含水比について、計測方法の誤差、計測時間などの特性を室内実験によって取得し、緩衝材の施工品質管理方法としての適用性を評価した。	放射性廃棄物地層処分、緩衝材、ベントナイト、再冠水、均質化
36	147	有	2008	高レベル放射性廃棄物地層処分の遠隔ハンドリング・定置技術の開発(7)緩衝材の施工品質管理方法の検討(その2)熱伝導率による緩衝材の密度管理方法	Development of Remote Handling and Emplacement Technologies at HLW Repository - (7) Studies on Construction Quality Control Method of Buffer Material (II) Density Control of Buffer Materials due to Heat Conductivity	小林一三、戸井田 克、中嶋誠門(鹿島建設) 戸栗智仁、朝野英一(原環センター)	日本原子力学会2008年春の年会	156 p459	高レベル放射性廃棄物地層処分に用いられる緩衝材には、透水性能や力学性能のほかに、廃棄体から生じる崩壊熱を周辺岩盤に逸散させるための熱伝導性能等が要求され、これまで数多くの緩衝材の熱伝導率が計測されている。本研究では、遠隔操作による緩衝材の密度管理手法として、熱伝導率を用いた手法の適用性に関して検討を行った。	放射性廃棄物地層処分、緩衝材、ベントナイト、再冠水、均質化
37	139	有	2009	高レベル放射性廃棄物処分における人工バリアの施工品質管理技術に関する検討		中嶋誠門、小林一三、戸井田 克(鹿島建設) 朝野英一、中嶋 均(原環センター)	土木学会第64回年次学術講演会(平成21年9月)	CS5-038 p209-210	HLW 処分場における人工バリアシステム(EBS)を構築するためには、操業技術である遠隔溶接・検査技術及び遠隔搬送・定置技術の確立が重要であると考えられる。そこで、各要素技術の到達度、適用範囲、適用条件及び操業安全と構築するEBSの品質に関わる考え方を定量的に示すことによって幅広い技術メニューの整備が行なわれている。このうち、遠隔搬送・定置技術の一部として実施中の「人工バリアの施工品質管理技術に関する検討」では、図-1の流れに沿って多様な処分概念や地質環境等を踏まえた上で、緩衝材施工時の様々な品質管理技術に関する調査及び試験を実施して、各品質管理技術の成立性や適用性を評価するための検討を行っている。先ず、緩衝材の性能を規定するうえで重要とされる乾燥密度および含水比の計測技術を本報告書に示す。計測精度を向上させるために、小型化・高精度化を図るための検討も実施している。	放射性廃棄物、地下空洞型処分、緩衝材、吹付け工法、品質管理
38	022	有	2010	小型化地中無線モニタリング装置の開発と緩衝材ブロックへの設置方法の検討	Development of the small type wireless transmitter and its installation into the bentonite block	奥津一夫、高村 尚、戸井田克、小林一三、藤澤 惣(鹿島建設)、須山泰宏、江藤次郎、吉村公孝*、田辺博三(原環センター) *現所属 原子力発電環境整備機構	日本原子力学会2010年秋の大会	C46 p169	緩衝材中でのモニタリングを対象に、小型化地中無線モニタリング装置の開発を行った。そして、吹付けベントナイト工法を用いて、緩衝材ブロックの製作と同時にモニタリング装置を緩衝材内部に設置する方法を実証し、モニタリング装置周りに密実に緩衝材を施工できることを確認したので報告する。	高レベル放射性廃棄物、人工バリア、緩衝材、品質管理、計測、密度、含水比
39	136	有	2010	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		小林一三、戸井田 克(鹿島建設) 朝野英一、須山泰宏、中嶋 均(原環センター)	土木学会第65回年次学術講演会(平成22年9月)	CS7-014 p27-28	高レベル放射性廃棄物地層処分等、処分施設のベントナイト系人工バリアである緩衝材は、水理、力学、化学の面から様々な性能が期待されているため、その要求性能も多岐に亘る。一方、この緩衝材の建設・操業に関して、これらの各要求性能を満足しているかどうかを確認しながら施工を進めることは困難なため、代替パラメータとして乾燥密度を採用し、乾燥密度が所定の値よりも大きければ、多岐に亘る要求性能は満足されるとして施工管理を行うことが一般的に考えられている(例えば1)。代替パラメータである乾燥密度によって一律に目標品質が定められているために、施工した緩衝材の様々な要求性能に対する余裕度(安全率)は各要求性能によって異なることになる。一方、緩衝材の施工方法に関しては、様々な検討がなされており、	放射性廃棄物、地下空洞型処分、緩衝材、吹付け工法、品質管理
40	137	有	2010	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1)全体試験計画及びベントナイトの膨潤圧による均質化評価		須山泰宏、朝野英一、中嶋 均(原環センター) 小林一三、戸井田 克(鹿島建設)	土木学会第65回年次学術講演会(平成22年9月)	CS7-013 p25-26	高レベル放射性廃棄物地層処分等、処分施設のベントナイト系人工バリアである緩衝材の施工品質は、施工方法によって異なり、例えば緩衝材内部に密度差が生じたり、緩衝材と岩盤壁部等との間に隙間が生じたりする。この施工品質を代表する密度は、再冠水による地下水の浸潤、膨潤挙動等の事象を踏まえ、均質化すると考えられているが、そのような実験結果は得られていない。また、再冠水過程においては、化学変質や力学的性能変化、熱影響も生じ、浸潤や膨潤挙動の評価が更に困難になると考えられる。しかしながら、長期挙動評価の初期状態(再冠水直後)は、均質化した緩衝材を仮定している。そこで、本研究では、再冠水過程が緩衝材の品質に与える影響	放射性廃棄物、ベントナイト系人工バリア、緩衝材、含水比調整、凍結混合
41	138	有	2010	吹付け工法による側部緩衝材の施工確認試験例—地下空洞型処分施設性能確認試験—		藤澤 惣、小林一三、戸井田 克(鹿島建設) 寺田賢二、秋山吉弘、中嶋貴弘(原環センター)	土木学会第65回年次学術講演会(平成22年9月)	CS7-007 p13-14	放射性廃棄物の余裕深度処分施設における人工バリアを構成するベントナイトは、5Ec相当の締固めエネルギーで所定の乾燥密度を達成できる材料であり1)、一般的には重機でなければ施工が困難である。側部緩衝材の施工区域は、側壁とコンクリートピットの間の狭隘な部分であり、大型重機による施工が困難な部位である。そのた	弾性波速度、ベントナイト、飽和過程、人工バリア、放射性廃棄物処分

No.	PDF-No.	関連	発行年	和文標題	英文標題	著者名	資料名	巻号ページ(発行年月)	要約	キーワード
42	131	有	2011		HYDRAULIC/MECHANICAL MODELING OF SMECTITIC MATERIALS FOR HMC ANALYTICAL EVALUATION OF THE LONG TERM PERFORMANCE OF TRU GEOLOGICAL REPOSITORY	Ichizo KOBAYASHI(Kajima) Hitoshi OWADA, Tomoko ISHII(RWMC)	ICEM2011 Sept. 25-29, 2011, Reims, FRANCE	ICEM2011-59090 p1-10	Aiming at evaluation of the long term performance of transuranic (TRU) geological repositories, the hydraulic/mechanical/chemical (HMC) analysis method has been studied. In this phase of research (four years) the hydraulic/mechanical modeling of smectitic materials for HMC analyses has been studied. In this paper, new experimental methods for investigation of the hydraulic/mechanical behavior of	高レベル放射性廃棄物、遠隔操作、緩衝材、品質管理、計測、密度、含水比
43	132	有	2011	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	Evaluation of the resaturation behavior of buffer material (2) Improvement of construction technique to reduce uncertainty of long term performance of HLW buffer material	小林一三、竹内 信、藤澤 惣、笹倉 剛(鹿島建設) 鈴木 圭、朝野英一(原環センター)	日本原子力学会2011年秋の大会	B32 p87	緩衝材の長期性能を評価する場合、緩衝材の施工から再冠水後までの連続した挙動把握が重要であるが、緩衝材の施工時に発生する密度分布などの影響で再冠水時の挙動が複雑となり、長期性能評価には不可避な不確実性が含まれていた。本報告では、この不確実性を低減させる目的で緩衝材の施工法の高度化を行った。	高レベル放射性廃棄物、遠隔操作、緩衝材、品質管理、計測、密度、含水比、熱伝導率
44	133	有	2011	長尺供試体を用いたベントナイト系人工バリア材料の一次元浸潤速度の評価		竹内 信、小林一三、笹倉 剛(鹿島建設) 朝野英一、鈴木 圭(原環センター)	土木学会第66回年次学術講演会(平成23年9月)	CS3-020 p39-40	高レベル放射性廃棄物地層処分施設において、閉鎖後から施設の再冠水終了までの期間は、人工バリア内に飽和領域と不飽和領域の境界面である浸潤フロントが存在し、その浸潤フロントが移動することによって人工バリア内の様々な力学/化学/水理学的現象が励起される。再冠水時に人工バリアに発生する現象としては、膨潤、力学性能変化、熱影響、化学変質などが挙げられるが、これらの現象は地下水浸潤の進行に伴い発生するため、各現象の開始時期を推定する上で地下水の浸潤速度を正確に把握することは極めて重要である。ベントナイト系材料の浸潤速度の測定はこれまでも行われており、例えば鈴木ら <sup>1)</sup> は、高さ20mmの供試体を浸潤させ一定時間後に供試体寸法を大きくせず、供試体解体時のずれも考慮する必要があった。その室内土槽による2次元浸潤試験によって、高レベル放射性廃棄物地層処分施設における緩衝材の施工に起因する隙間や大間隙(ベレット充填工法の隙間)が、地下水浸潤に及ぼす影響について調べた。	compacted bentonite, compression, consolidation swelling, degree of saturation
45	128	有	2012	緩衝材の再冠水挙動評価(4)緩衝材の施工方法に起因した隙間や大間隙が浸潤状況に及ぼす影響	Evaluation of the resaturation behavior of buffer materials (4) Effects of the gaps and large voids due to construction of buffer on the ground-water seepage	小林一三(鹿島建設) 鈴木 圭、朝野英一、矢萩良二(原環センター)	日本原子力学会2012年秋の大会	B32 p32		bentonite, shotclay, engineered barrier
46	129	有	2012	緩衝材の再冠水挙動評価(3)緩衝材のパイピング・エロージョン挙動および品質評価	Evaluation of the resaturation behavior of buffer material (1) Experimental investigation of piping and erosion behavior of buffer block and pellet	鈴木 圭、朝野英一、矢萩良二(原環センター) 小林一三(鹿島建設)	日本原子力学会2012年秋の大会	B31 p31	緩衝材の過渡的段階(地下水の再冠水)を考慮した品質評価を行うため、処分孔に地下水が流入した場合の緩衝材に与える影響について圧縮成型したブロック緩衝材とベレット充填した場合を対象に、パイピング(水みち形成)とエロージョン(侵食)の発生条件、流量低下に伴う自己修復機能の発現条件を調査したので報告する。	
47	025	有	2013	緩衝材の再冠水挙動評価(5)EBS設計・施工仕様設定のための基盤研究	Evaluation of the re-saturation behavior of buffer material (5) Basic research program for drafting of design and construction specification of EBS (Engineered Barrier System)	鈴木 圭、矢萩良二、朝野英一(原環センター) 小林一三(鹿島建設)	日本原子力学会2013年秋の大会	O56 p723	高レベル放射性廃棄物地層処分施設の計画に際して、「施工方法に起因する密度分布の範囲(密度差)の設定」に加え、緩衝材が飽和に至るまでの期間に緩衝材性能に影響を与える要因(流入量、地下水組成、緩衝材成分、隙間、浸潤速度等)を設定し、緩衝材のパイピング・エロージョン事象に対処する設計・施工仕様を定めることが望ましい。本報告は、EBS設計・施工仕様設定のための基盤研究計画に関するものである。	



No.	PDF-No.	関連	発行年	和文標題	英文標題	著者名	資料名	巻号ページ(発行年月)	要約	キーワード
48	027	有	2013	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	Evaluation of the re-saturation behavior of buffer material (7) Evaluation of piping and erosion phenomena of bentonite block and pellet, and amount of erosion	竹内伸光、鈴木 圭、朝野英一(原環センター) 小林一三(鹿島建設)	日本原子力学会2013年秋の大会	O58 p725	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(パイピング)、浸食(エロージョン)が発生し、ペ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。そこで、小規模試験、長尺試験を行いパイピング・エロージョン挙動の確認をした。	
49	031	有	2013		Experimental investigations of piping phenomena in bentonite-based buffer materials for an HLW repository	K.SUZUKI, H.ASANO, R.YAHAGI (Radioactive Waste Management Funding and Research Center) I.KOBAYASHI(Kajima Corporation) P.SELLIN (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.) C. SVEMAR AND M. HOLMQVIST. (SKB International)	2013The Mineralogical Society	Clay Minerals, (2013) 48, 363-382	During the installation of the buffer in a deposition hole of an HLW repository, it is necessary to control water flow from the fractured rock into the deposition hole. Water flow with inflow rate greater than 0.001 l/min may cause piping and erosion of the buffer, and may trigger mass redistribution of the buffer, sedimentation and material separation of bentonite materials. This paper describes the condition of parameters which cause piping and erosion; revised conditions which keep advection, inflow rate, buffer component, gap between buffer materials, gap between outside wall and buffer block, and type of water. The results from the experiment show the condition of the selfsealing function of bentonite materials, formation of piping, allowable limit of inflow rate in the case of an Na type bentonite block of 70 wt.%	放射性廃棄物, 地層処分, ペントナイト, 透水試験, フローポンプ
50	118	有	2013	ペントナイト吹付けによる緩衝材構築工法(SHOTCLAY 工法)の施工管理方法に関する検討		石井健嗣、小林一三、笹倉剛、福田勝美、武地真一(鹿島建設) 神津圭輔(AGC プライブリコ)	土木学会第68回年次学術講演会(平成25年9月)	CS11-020 p39-40	これまで著者らは、放射性廃棄物処分施設におけるペントナイト系人工バリア(以下、緩衝材)の構築工法として、湿式吹付け技術であるSHOTCLAY 工法(以下、本工法)の適用性を検討し、均質かつ高密度な緩衝材が構築可能であることを確認した1)2)。しかしながら、本工法では、施工部に付着せず跳ね返ったりバウンド材料の再利用方法が課題であった。すなわち、ほぼ一定の含水比に調整した吹付け前の材料に吹付け毎に含水比が低下するリバウンド材料を混合し再利用した場合、リバウンド材料の混合割合によって混合材料の含水比が変化するため、吹付けた緩衝材の品質を一定に保つことが難しかった。そこで、本報では吹付け材料の含水比と材料供給量を	放射性廃棄物処分, 人工バリア, ペントナイト, 吹付け, 材料供給
51	119	有	2013	吹付けによる側部緩衝材施工の高度化		小林一三、石井健嗣、笹倉剛、福田勝美、武地真一(鹿島建設) 寺田賢二、秋山吉弘、矢田勤(原環センター)	土木学会第68回年次学術講演会(平成25年9月)	CS11-022 p43-44	地下空洞型処分施設性能確認試験(以下、本試験と称する)では、低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分などに適用される概念に基づいた地下空洞型処分施設を模擬した試験施設(以下、本施設と称する)を構築することによって、その概念の実現性を施工の観点から評価している1)。本施設(図-1参照)は廃棄体周囲に設置されるセメント系材料(充填材、コンクリートピット、低拡散材等)とペントナイト系材料(緩衝材)から構成され、これらと空洞周辺の岩盤を合わせた多重バリアが放射性核種の長期に亘る移行を抑制する。本稿では、ペントナイト系人工バリアのうち側部緩衝材吹付けの施工品質の向上や施工の効率化を目的とした検討結果を報告する。	放射性廃棄物処分, 人工バリア, ペントナイト, 吹付け, 施工法, 高密度
52	120	有	2013	緩衝材の再冠水挙動評価(6)比抵抗計測による再冠水時の緩衝材の飽和度分布の推定	Evaluation of the resaturation behavior of buffer materials (6) Estimation of saturation degree by measurement of specific resistance of buffer materials during saturation.	小林一三(鹿島建設) 鈴木 圭、朝野英一(原環センター) 矢萩良二(清水建設)	日本原子力学会2013年秋の大会	O57 p724	緩衝材の施工法に起因する密度分布や隙間が地下水浸潤挙動に及ぼす影響を取得する目的で浸潤試験を実施し、新たに取得した乾燥密度ごとの飽和度と比抵抗値の関係を用いて、飽和度分布を取得した。	透水試験, 透水係数, ペントナイト, フローポンプ式透水試験
53	121	有	2013	吹付けによる緩衝材構築方法の高度化検討	Improvement of spraying method for construction of buffer materials	石井健嗣 小林一三 笹倉剛 福田勝美 武地真一(鹿島建設)	日本原子力学会2013年春の年会	A18 p18	放射性廃棄物処分施設における緩衝材(ペントナイト系人工バリア)の湿式吹付けによる構築方法であるSHOTCLAY 工法の更なる高度化を図るべく、吹付け材料の含水比が変化した場合においても、材料供給量を調整することで一定の施工品質を満足できる施工管理条件を取得した。	放射性廃棄物地層処分, 透水試験, バリア材料, 低動水勾配
54	122	有	2013	埋め戻しのための貧配合ペントナイトの吹付け施工に関する検討	Study on the spraying method of poor mixed bentonite for backfill	小林一三 笹倉剛 石井健嗣 福田勝美 柏崎博光 竹内信(鹿島建設)	日本原子力学会2013年春の年会	A17 p17	LLW余裕深度処分施設(以下、L1施設)における埋め戻し箇所への吹付け工法の適用性を確認するために貧配合ペントナイトの吹付けを行った。さらに、吹付けにより施工した埋め戻し材の力学・水理性能を室内試験で確認した。	HLW・TRU 地層処分, ケイ砂含有ペントナイト, 吹付け工法, 締固めエネルギー
55	030	有	2014	ペントナイト系人工バリアへの地下水浸潤状況の評価	Evaluations of Seepage Situation of Ground Water into Bentonite Engineered Barrier	小林一三、笹倉 剛(鹿島建設) 朝野英一、鈴木 圭(原環センター)	鹿島技術研究所年報 第62号 2014年9月30日	-	高レベル放射性廃棄物地層処分施設の長期性能評価では、その初期状態として、ペントナイト系人工バリアを密度分布などが均質で、かつ飽和状態と仮定することが多い。これは、施設の建設・操業中に低下していた施設周辺の地下水位が、施設の閉鎖後に回復していく過程で、不飽和状態であるペントナイト系人工バリアに発生する事象が十分に定量評価されるに至らず理想的な条件設定となっていたためである。近年の研究結果では、緩衝材の施工に起因する密度分布は、緩衝材が飽和しても残留する可能性が示されており、仮に再冠水後の緩衝材に密度分布が存在すると、現状の長期性能評価の初期状態は、必ずしも保守側の設定となっていないことが懸念される。	人工バリア, ペントナイト, 締固め, 膨潤圧
56	109	有	2014	湧水が緩衝材の施工品質に及ぼす影響とその対策		石井健嗣、小林一三、笹倉 剛(鹿島建設) 朝野英一、鈴木 圭、竹内伸光(原環センター)	土木学会第69回年次学術講演会(平成26年9月)	CS9-026 p51-52	これまでに実施されてきた放射性廃棄物処分施設におけるペントナイト系人工バリア(以下、緩衝材)の施工に関する検討では、湧水のない箇所を選択1)したり、防水シートを設置2)したりすることによって、施工エリアや緩衝材自体が湧水や滴水などを受けないようにする対策がなされてきた。このため、緩衝材施工時の湧水や滴水が緩衝材の施工品質に及ぼす影響に関しては十分に検討されていない。そこで、湧水環境を想定した実規模の施工エリアに対して、緩衝材の原位置施工法の一つであるペントナイト吹付け工法3)を用いた施工試験を実施し、湧水が緩衝材の施工品質に及ぼす影響とその対策に関する検討を行った。	放射性廃棄物処分施設, ペントナイト系人工バリア, 締固め工法, 含水比調整

No.	PDF-No.	関連	発行年	和文標題	英文標題	著者名	資料名	巻号ページ(発行年月)	要約	キーワード
57	110	有	2014	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	Evaluation of the re-saturation behavior of buffer material (8) Experimental investigations on the piping and erosion phenomena	小林一三(鹿島建設) 鈴木 圭、朝野英一、江藤次郎、竹内伸光(原環センター)	日本原子力学会2014年秋の大会	F11 p194	緩衝材のパイピングとエロージョン現象に関する試験を行い、工学的対策や施設設計に資する情報を整理した。	放射性廃棄物処分、人工バリア、ベントナイト、吹付け、高密度
58	111	有	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	Evaluation of the re-saturation behavior of buffer material (9) Evaluation of piping and erosion phenomena of bentonite materials on the way of its design specification	鈴木 圭、竹内伸光、江藤次郎、朝野英一(原環センター) 小林一三(鹿島建設)	日本原子力学会2014年秋の大会	F12 p195	高レベル放射性廃棄物地層処分施設の再冠水時において、緩衝材にある程度以上の流量の地下水が接すると、パイピングとエロージョン現象が発生し、緩衝材の長期性能のうち特に低透水性に影響を及ぼす可能性がある。パイピングとエロージョン現象が緩衝材の長期性能に及ぼす影響を小さくするために、①処分坑道の早期閉鎖 ②処分孔への地下水流入量の低減 ③緩衝材の高乾燥密度化等を考えて、緩衝材の長期性能への影響を低減する考え方を示した。	放射性廃棄物処分施設、ベントナイト、吹付け工法
59	356	有	2014	縦落し式混合装置で製造したベントナイト混合土の吹付け施工試験	Air spraying test of bentonite-sand mixture made by fall mixing method	久慈雅栄、飯島 健(前田建設)	日本原子力学会2014年秋の大会	F10 p193	放射性廃棄物処分場等において適用が考えられているベントナイト混合土の製造方法として、縦落し混合・加水方式を採用したミストブレンダー工法を開発した1)~7)。本技術でNa型ベントナイト混合土を製造するとともに吹付け施工試験を実施し、良好な製造の確認と吹付け設備の改良効果や吹付けられた材料の各種土質特性等の結果を得た。	低レベル放射性廃棄物、TRU放射性廃棄物、緩衝材、ベントナイト、吹付け工法
60	357	無	2014	アルカリ性地下水で再冠水したベントナイト緩衝材の透水および化学的緩衝性能に関する研究	Study on hydraulic conductivity and chemical buffering capacity of bentonite upon reflooding with alkaline groundwater	津川洸太、渡辺直子、小崎完、上野純(北大)	日本原子力学会2014年秋の大会	F13 p196	乾燥状態のベントナイト試料に対してアルカリ水の透水試験を行い、高レベル放射性廃棄物地層処分におけるベントナイト緩衝材の再冠水時の透水挙動および化学的緩衝能に関する基礎データを得るとともに、それらに関する反応機構を検討した。	人工バリア、ベントナイト、締固め、膨潤圧
61	358	無	2014	福島原発事故で発生した廃棄物の合理的な処理・処分システム構築に向けた基盤研究;(28)圧密ベントナイト中のオキシ陰イオンの拡散挙動	Basic Studies for Developing Rational Treatment and Disposal System of Radioactive Wastes Generated by Fukushima Dai-ichi Nuclear Accident (28) Diffusion Behavior of Oxyanions in Compacted Bentonite	出光一哉、湯原 勝、浜田 涼、小崎 晃、岸本将尚、稲垣八穂広、有馬立身(九大)	日本原子力学会2014年秋の大会	F44 p227	福島原発事故で発生した汚染水処理により高塩濃度の廃棄物が発生する。これら廃棄物を処分した場合のベントナイト中のオキシ陰イオンの拡散挙動を実験的に調査した。	放射性廃棄物処分施設、ベントナイト系人工バリア、吹付け工法
62	359	無	2014	福島原発事故で発生した廃棄物の合理的な処理・処分システム構築に向けた基盤研究;(29)MX-80ベントナイト中のHTOおよび陽イオンの拡散に及ぼす塩濃度影響	Basic Studies for Developing Rational Treatment and Disposal System of Radioactive Wastes Generated by Fukushima Dai-ichi Nuclear Accident (29) Effect of salinity on diffusion of HTO and cations in MX-80 bentonite	Zafrul Kabir、嶋田 遼、渡邊直子、小崎 完(北大)	日本原子力学会2014年秋の大会	F45 p228	高塩濃度の廃棄物と接触したベントナイトの緩衝材としての性能を評価するため、異なる塩濃度条件下でベントナイト中のSr2+イオンおよびHTOの見かけの拡散係数および拡散の活性化エネルギーを決定した。	放射性廃棄物処分施設、ベントナイト系人工バリア、締固め工法、含水比
63	362	無	2014	地球化学計算コードを用いた圧縮ベントナイト中の間隙水化学と収着分配係数の不確実性解析	Uncertainty Analyses for the Porewater Chemistry and Distribution Coefficients in Compacted Bentonite using the PHREEQC Code	四辻健治、館 幸男(JAEA) 波戸真治(V.I.C.)	日本原子力学会2014年秋の大会	F05 p188	圧縮ベントナイト中における間隙水化学と核種の収着分配係数の不確実性解析を実施するため、ラテン超方格サンプリング法を用いて間隙水と収着モデルに関するパラメータをサンプリングし、地球化学計算コードPHREEQCにより平衡反応計算して、パラメータ間の相関係数等を評価した。	
64	363	有	2014	幌延URLにおける人工バリアの性能確認試験;(8)緩衝材中の計測計画	The in-situ experiment for verification of performance of engineered barrier system in oronobe Underground Research Laboratory: (8) Plan of measurement for buffer material	白瀬光泰(大成建設) 城 まゆみ、本島貴之、丹生屋純夫、(大成・大林・三井住友特定建設工事共同企業体) 中山 雅、棚井憲治(JAEA)	日本原子力学会2014年秋の大会	F18 p201	幌延URLの深度350m調査坑道で実施する、人工バリア性能確認試験では、実物大の模擬人工バリアを設置し、坑道の埋め戻しまでを行う計画である。本試験では、緩衝材内に腐食電位計、土圧計、間隙水圧計等を設置するとともに、比抵抗トモグラフィにより緩衝材への地下水の浸潤状況を計測する計画である。	
65	364	無	2014	ウランイオンの自由水およびモンモリロナイト中における拡散挙動;分子動力学計算	Diffusion of uranyl ions in water and montmorillonite: Molecular dynamics calculation	有馬立身、稲垣八穂広、出光一哉(九大) 河村雄行(岡山大) 四辻健治、館 幸男(JAEA)	日本原子力学会2014年秋の大会	F04 p187	ウランイオン-水-炭酸イオン-モンモリロナイトを計算対象とし、自由水およびモンモリロナイト層間水中における拡散挙動を分子動力学法を用いて評価した。モンモリロナイトについては層間水および層間水の厚さの関数としてウランイオンの拡散係数を評価した。	



No.	PDF-No.	関連	発行年	和文標題	英文標題	著者名	資料名	巻号ページ(発行年月)	要約	キーワード
66	365	有	2014	坑道すき間へのベントナイト・ペレット充てん方法の高度化の試み	Remote Filling of Bentonite Pellets into the Interspaces between PEM and Tunnel	石井 卓, 中島 均, 斎藤 亮(清水建設)	日本原子力学会2014年春の年会	I07 p361	PEM と坑道内壁との間の狭いすき間空間にベントナイト・ペレットを充てんする埋戻し方法のさらなる高度化をめざした小規模な室内実験を実施し、目視により充てん性を簡易に確認できることを見出された。	
67	366	有	2014	浅地中処分における分配係数の測定：(1)ベントナイト混合土の分配係数について	Measurements of Distribution Coefficients in Shallow Land Burial (1) Distribution Coefficients of Bentonite Mixed Soil	野下健司(日立) 見付樹大(日本原燃)	日本原子力学会2014年春の年会	I18 p372	浅地中ピット処分施設の難透水性覆土の材料として、ベントナイト混合土を検討している。本研究では、核種を陽イオン核種、陰イオン核種、金属イオン核種、 $\alpha$ 核種の4つのグループに分類し、ベントナイトの初期材質、長期的な化学変質、地下水塩濃度などが分配係数に及ぼす影響について体系的にデータ取得を実施した。その結果、分配係数データを大幅に拡充することができ、今後より高い信頼性で安全評価を実施することが可能となった。	
68	367	無	2014	福島原発事故で発生した廃棄物の合理的な処理・処分システム構築に向けた基盤研究：(18)ベントナイト中の亜セレン酸の拡散の活性化エネルギーの塩強度依存性	Basic Studies for Developing Rational Treatment and Disposal System of Radioactive Wastes Generated by Fukushima Dai-ichi Nuclear Accident (18) Ionic strength dependence of the activation energy of diffusion of the selenite ion in bentonite	出光一哉, 小崎 晃, 湯原 勝, 稲垣 八穂広, 有馬立身(九大)	日本原子力学会2014年春の年会	I22 p376	福島原発事故で発生した廃棄物の処分において想定される高塩濃度の水溶液と接触させたベントナイトにおけるSeの拡散の活性化エネルギーを測定した。	
69	368	無	2014	福島原発事故で発生した廃棄物の合理的な処理・処分システム構築に向けた基盤研究：(19)高塩濃度条件下におけるベントナイト中のCsの拡散に及ぼす内部微細構造の影響	Basic Studies for Developing Rational Treatment and Disposal System of Radioactive Wastes Generated by Fukushima Dai-ichi Nuclear Accident (19) Effect of microstructure of bentonite on the Cs diffusion in bentonite under high salinity condition	小池雄介, 渡辺直子, 小崎 完(北大)	日本原子力学会2014年春の年会	I23 p377	ベントナイト中のCsの拡散に及ぼす塩濃度の影響を明らかにするため、高塩濃度条件下の試料の底面間隔をX線回折によって決定するとともに、Csの収着係数および収着エンタルピーをバッチ式収着試験によって決定し、拡散実験で得られたCsの見かけの拡散係数および活性化エネルギーとの関連を検討した。	
70	369	無	2014	ベントナイト・ペレットを水中投入して遮水する方法の実現可能性	Feasibility study on water sealing method by filling bentonite pellets	中島 均, 石井 卓, 斎藤 亮(清水建設)	日本原子力学会2014年春の年会	I54 p408	福島第一原子力発電所の事故において発生した汚染水は、建屋や配管などの亀裂から外部に漏水しており、これを適切に止水することが課題となっている。水の流れがある状態で、このような箇所を止水する方法として、吸水膨張性粘土であるベントナイトの使用が考えられる。ベントナイトを球形に加工したベントナイトペレットは、水中で容易に沈降し、止水性を発揮できる密度に堆積し、亀裂からの漏水を止めることが可能であることを確認した。	
71	104	有	2015	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		小林一三(鹿島建設) 大和田 仁, 林 大介(原環センター)	土木学会第70回年次学術講演会(平成27年9月)	CS12-025, p49-50	放射性廃棄物の内、半減期が長いTRU 廃棄物の処分概念は、図1に示すようにセメント系人工バリアとベントナイト系人工バリアを併用することを基本としており1)、その長期的な性能に関する信頼性を向上させるべく、両者の化学的な相互作用を考慮した長期性能評価に関する検討が進められている2)。本報告では、長期性能評価に対して重要と考えられるベントナイト系人工バリアの化学的な変質を考慮した止水性能評価方法を提案されている1)。ここで(Dc)tとは、CELと締固め曲線の変動を考	燃料デブリ、地層処分、水の放射線分解、金属腐食、ガス発生
72	106	有	2015	飽和度に着目した転圧試験結果の整理	Construction Method of High Density Compacted Soil by Means of Pre-Mixed Spraying Method	岡本道孝, 小林一三, 吉田 輝, 北本 幸義, 三上大道, 藤崎勝利(鹿島建設) 龍岡文夫(東京理科大学)	第50回地盤工学研究発表会 2015年9月	503 D-09 p1005-1006	近年、放射性廃棄物の最終処分に関する議論が高まりを見ている。この放射性廃棄物の最終処分施設では、狭い場所ではベントナイト系材料を高密度に締め固めることが必要とされている。例えば、低レベル放射性廃棄物余剰深度処分施設では、図-11に示すように、直径10数mの空洞内に、幅(厚さ)1m程度の低透水層(ベントナイト系人工バリア)を配する処分施設が検討されている1)。この低透水層は、粗砕ベントナイトを乾燥密度1.6Mg/m <sup>3</sup> 程度に締め固めたものが想定され、その乾燥密度は、5Ec程度で突き固めた場合の最大乾燥密度に相当する。従来の方法では、この高密度の締め固めは、地盤工学の分野では、高圧力での締め固めが行われてきた。	
73	107	有	2015	湿式吹付け工法による高密度締固め土の構築技術(SHOTCI、AY工法)	Construction Method of High Density Compacted Soil by Means of Pre-Mixed Spraying Method	小林一三, 石井健嗣, 笹倉 剛(鹿島建設)	地盤工学会誌	63-3 (686) p24-25	近年、放射性廃棄物の最終処分に関する議論が高まりを見ている。この放射性廃棄物の最終処分施設では、狭い場所ではベントナイト系材料を高密度に締め固めることが必要とされている。例えば、低レベル放射性廃棄物余剰深度処分施設では、図-11に示すように、直径10数mの空洞内に、幅(厚さ)1m程度の低透水層(ベントナイト系人工バリア)を配する処分施設が検討されている1)。この低透水層は、粗砕ベントナイトを乾燥密度1.6Mg/m <sup>3</sup> 程度に締め固めたものが想定され、その乾燥密度は、5Ec程度で突き固めた場合の最大乾燥密度に相当する。従来の方法では、この高密度の締め固めは、地盤工学の分野では、高圧力での締め固めが行われてきた。	
74	332	無	2015	CO2レーザによるレーザ誘起現象を利用した水中岩石・金属加工技術	A technology employing bubble induced by CO2 laser for processing stone and metal in water	小林俊雄, 中村雅洋(日本海洋掘削) 大谷清伸(東北大学)	日本原子力学会2015年秋の大会	G19 p328	CO2レーザは水への吸収特性の良さによりレーザ照射時シリンダリカル形状誘起バブルが生成される。このため、アシストガスを使用せずCO2レーザ照射のみで懸濁水中金属・岩石加工が可能となる。	コロイド, Am(III), 収着, 不可逆性
75	333	無	2015	ベントナイト懸濁水中での水野放射線分解による水素発生に関する研究	Experimental studies on hydrogen generation by water radiolysis in aqueous suspensions of bentonite	永石隆二, 井上雅男, 松村太伊知, 小川徹(原子力機構) 遠藤慶太(上智大)	日本原子力学会2015年秋の大会	H01 p366	高レベル放射性廃棄物(HLW)地層処分人工バリアの緩衝材(粘土充填層)として考えられているベントナイトでは、天然バリア(地層岩盤)からの地下水の浸入及びHLW廃棄体からの放射線の照射によって水の分解が起こり、分解で生成したラジカル/分子性の活性種がベントナイトを構成する成分や水中の溶存種と反応する。本研究では、Co-60ガンマ線分解によってベントナイト懸濁水溶液から発生する水素等を測定	鉄、ベントナイト、変質、原位試験
76	334	無	2015	Np(V)のベントナイトコロイドに対する収着の不可逆性評価	Investigation of sorption reversibility of Np(V) on bentonite colloids	中田弘太郎(電中研) 石寺孝充(原子力機構) 黒澤精一, 林雅則, 別部光里, 助川誠裕(検査開発)	日本原子力学会2015年秋の大会	H04 p369	Np(V)のベントナイトコロイドに対する収着の不可逆性を調べるため、透析法を用いた収着・脱離試験を実施した。収着試験後に実施した逐次脱離試験においては、Npのベントナイトコロイドへの分配係数が脱離回数に伴って増加したことから、Npの一部はベントナイトコロイドに不可逆的に収着する可能性が示唆された。	地層処分, ベントナイト, 超音波, 含水比計測, 不飽和粘土
77	335	無	2015	圧縮ベントナイト中の超音波伝播挙動に関する研究	A Study of Ultrasonic Characteristics of Compacted Bentonite	木村駿, 木倉宏成(東工大) 木本和志(岡山大)	日本原子力学会2015年秋の大会	H28 p393	高レベル放射性廃棄物の地層処分における長期安全性評価のために、緩衝材中の地下水の詳細な挙動の把握が求められている。緩衝材として用いられるベントナイト中の含水量を計測するための手法として、超音波計測技術の適用可能性を検討した。圧縮ベントナイトを用いた透過波観察実験を行い超音波伝播特性の調査を行った。	地層処分, 性能評価, 分子動力学法, モンモリロナイト層間, 膨潤特性

No.	PDF-No.	関連	発行年	和文標題	英文標題	著者名	資料名	巻号ページ(発行年月)	要約	キーワード
78	336	無	2015	浸透圧による膨潤圧を考慮した弾塑性モデルによる締固めたベントナイトの一次元膨潤挙動のシミュレーション	Simulation of one-dimensional swelling behavior of compacted bentonite by elasto-plastic model considering osmotic pressure		日本原子力学会2015年秋の大会	H29 p394	既往の弾塑性モデルにより浸透圧による膨潤の影響を考慮する方法を検討した結果、膨潤メカニズムの変化に応じてモデルのパラメータの値を変化させることにより除荷時の一次元膨潤挙動を表現できることを示した。	TRU 廃棄物、ベントナイト、ガス移行、2 相流パラメータ、逆解析、GETFLOWS
79	337	無	2015	飽和方法が異なるカルシウムベントナイト混合土の透水係数	Effect of saturation process on hydraulic conductivity of calcium bentonite mixture	中島均、齋藤亮、石井卓(清水建設)	日本原子力学会2015年秋の大会	H30 p395	高速透水試験は難透水性材料(透水係数1E-13m/s 程度)の透水係数を1~2週間で得ることができる簡易試験法である1)2)。供試体の飽和方法が一般的な透水試験と異なる。カルシウム型ベントナイトを主体とした難透水性材料へ高速透水試験を適用し、飽和方法の違いと透水係数の関係を検討した。	Na 型ベントナイト、過飽和ケイ酸、析出、核種遅延効果
80	338	無	2015	カリウムイオンが処分場ベントナイトに与える影響の検討 KOH 液透過により締固めベントナイト中に生じたイライト/スメクタイト混合層の評価および透水性の変遷に関する考察	Study on the effects of potassium ion on the bentonite of the radwaste repository Identification of illite/smectite interstratifications produced in compacted bentonite permeated by	三好 悟 木村志照 甚野智子(大林組) 三歩一 孝、佐藤 努(北大) 柴田 真仁(太平洋コンサルタント)	日本原子力学会2015年秋の大会	H31 p396	予めK型処理を施したベントナイトを透水セルに詰め込み、KOH溶液を長期間透過する実験を行ったところ、試料中のモンモリロナイトがイライト/モンモリロナイト混合層鉱物に変質した。XRD 測定結果とXRD シミュレーション結果のフィッティングにより、混合層の定量評価を試みた。また、水銀圧入法により試料の間隙構造を計測した。セメント系材料を使用した地層処分において、オーバーバックに接触する溶液性状を把握するために、ケイ砂混合圧縮ベントナイトを用いた強アルカリカラム試験で得られた流出液pHの変化を、地球化学解析コードPHREEQCで解析し、ベントナイトのアルカリ変質挙動並びにpH緩衝効果を検討した。	ベントナイト、プルトニウム、鉄共存、移行
81	339	無	2015	強アルカリ環境下でのベントナイ変質と二次鉱物強アルカリ環境下でのベントナイ変質と二次鉱物析出の解析の解析	Analysis of Bentonite Alteration and Precipitation of Secondary Minerals in Hyper Alkaline Solution	稲井隆将、大江俊昭(東海大学) 小崎 完、渡辺直子、津川 洸(北海道大学)	日本原子力学会2015年秋の大会	H32 p397	放射線照射による二次変質を抑制するために、ケイ砂混合圧縮ベントナイトを用いた強アルカリカラム試験で得られた流出液pHの変化を、地球化学解析コードPHREEQCで解析し、ベントナイトのアルカリ変質挙動並びにpH緩衝効果を検討した。	放射性廃棄物処分、ベントナイト、ブームクレイ、堆積岩、拡散、ヨウ素
82	340	無	2015	アルカリ環境におけるCa型ベントナイト溶解速度の測定	Dissolution rate measurement of Ca-bentonite under alkaline condition	佐藤久夫、加藤博康、山口耕平、下田紗音子(三菱マテリアル)	日本原子力学会2015年秋の大会	H33 p398	人工バリア緩衝材の溶解特性を調べるため、山形月布産Na型ベントナイト(クニゲルV1)と蔵王土厚産Ca型ベントナイト(クニボン)中のモンモリロナイトを、それぞれ凝集した粒子状態のまま高アルカリ溶液通水条件で、両者の溶解速度を干渉計を用いてその場測定して比較し、Ca型ベントナイトの溶解挙動を評価した。	Cs 型モンモリロナイト、吸着構造、水和、133Cs 固体NMR
83	341	有	2015	埋め戻しによって形成されるCa 型ベントナイトへの過飽和ケイ酸の析出挙動	Deposition Behavior of Supersaturated Silicic Acid onto Ca-bentonite Formed by Backfilling	笹川剛、千田太詩、新堀雄一(東北大学)	日本原子力学会2015年秋の大会	H34 p399	本研究では、流路閉塞による核種遅延効果が期待されるCa 型ベントナイトへの過飽和ケイ酸の析出挙動について実験的検討を行った。ケイ酸析出実験から、固相を非晶質シリカとした先行研究と同程度の析出速度定数が得られ、Ca 型ベントナイトもケイ酸の空間的再分配に大きく寄与することが明らかになった。	燃料デブリ処分、福島第一原子力発電所、地層処分、人工バリア
84	342	無	2015	福島原発事故で発生した廃棄物の合理的な処理・処分システム構築に向けた基礎研究(47)モンモリロナイト含有率の異なるベントナイト中における陰イオンの拡散挙動のイオン強度依存性	Basic Studies for Developing Rational Treatment and Disposal System of Radioactive Wastes Generated by Fukushima Dai-ich Nuclear Accident (47) Ionic strength dependence of anion diffusion behavior in bentonite different in montmorillonite content	出光一哉、浜田涼、小川由貴、大久保徳弥、稲垣八穂広、有馬立身(九大)	日本原子力学会2015年秋の大会	H35 p400	福島原発事故で発生した廃棄物の処分において想定される高塩濃度の水溶液が、種々のモンモリロナイト含有率のベントナイト中の陰イオンの拡散挙動に与える影響を調べた。	
85	343	有	2015	廃棄体回収のための緩衝材除去装置の開発(1)全体概要	Development of a buffer material removal equipment as a retrieval technology for HLW repository. (1)Development Plan	朝野英一、塚原成樹、岩谷隆文(原環センター) 戸栗智仁、矢萩良二(清水建設)	日本原子力学会2015年秋の大会	H52 p417	高レベル放射性廃棄物地層処分の作業期間中を対象とした回収技術として塩水を用いた緩衝材除去技術を開発し、実材料を用いた実規模スケールの地上試験を実施した。	モンモリロナイト、NMR 緩和法、空隙サイズ
86	344	有	2015	廃棄体回収のため緩衝材除去装置開発(2)装置開発	Development of a buffer material removal equipment as retrieval technology for HLW repository. (2)Development of a buffer material removal equipment as a retrieval technology.	塚原成樹、朝野英一、岩谷隆文(原環センター) 藤吉卓也、戸栗智仁(清水建設)	日本原子力学会2015年秋の大会	H53 p418	緩衝材除去装置の開発では、噴射・吸引設備、塩水リユース設備、遠隔操作設備の3設備から構成される緩衝材除去システムの設計、製作、組立を実施した。	高レベル放射性廃棄物、地層処分、自然災害、火災、人工バリア
87	345	有	2015	廃棄体回収のための緩衝材除去装置の開発(3)緩衝材除去装置による実規模試験	Development of a buffer material removal equipment as a retrieval technology for HLW repository. (3)Removal test of buffer material in full-scale	岩谷隆文、塚原成樹、朝野英一(原環センター) 矢萩良二、戸栗智仁(清水建設)	日本原子力学会2015年秋の大会	H54 p419	前報までに報告した「緩衝材除去システム」を用いて地上にて実規模スケールでの緩衝材除去試験を実施した。試験により、緩衝材除去システムが有する緩衝材の除去機能、システムの成立性、操作性を確認した。	
88	346	有	2015	廃棄体回収のための緩衝材除去装置の開発(4)3D計測技術の開発	Development of a buffer material removal equipment as a retrieval technology for HLW repository. (4)Development of 3D measuring technique	矢萩良二、竹内 啓五(清水建設) 朝野英一、塚原成樹、岩谷隆文(原環センター)	日本原子力学会2015年秋の大会	H55 p420	緩衝材除去装置の坑道内の移動や塩水を用いた緩衝材の除去、模擬廃棄物の把持動作を支援するために、正確な空間情報を把握可能な3D計測技術を開発した。本報告では、3D計測技術を用いた遠隔制御の方法と、実規模スケール試験による計測結果について報告する。	
89	347	有	2015	幌延URL における人工バリアの性能確認試験(11)緩衝材、埋め戻し材およびコンクリートプラグの施工	The in-situ experiment for verification of performance of engineered barrier system in Horonobe Underground Research Laboratory (11)Construction of buffer material, backfill material and concrete plug	中山雅、大野宏和、棚井憲治(原子力機構) 白瀬光泰、丹生屋純夫、下原正弘(大成・大林・三井住友JV)	日本原子力学会2015年秋の大会	H57 p422	幌延URL の深度350m 調査坑道で実施している人工バリア性能確認試験では、実物大の模擬人工バリアを設置し、坑道の埋め戻しまでを行った。本試験では、設置き方を想定した試験孔内に緩衝材および模擬オーバーバックを設置し坑道を埋め戻したのち、埋め戻し部を閉塞するためにコンクリートプラグを設置した。本報告では、人工バリア、埋め戻し材およびコンクリートプラグの施工について報告するとともに、取得した試験結果を報告する。	使用済燃料、直接処分、二酸化ウラン、溶解速度、炭酸濃度影響、酸化還元状態
90	348	無	2015	第一原理計算と <sup>133</sup> Cs 固体核磁気共鳴法によるモンモリロナイトに吸着したCs 吸着構造の解析(1)GIPAW 法による <sup>133</sup> Cs NMR パラメータ予測	Structural analysis of Cs adsorption on Cs-montmorillonite using ab initio calculation and <sup>133</sup> Cs solid state NMR (1) GIPAW prediction of <sup>133</sup> Cs NMR parameters	大窪貴洋、岩館泰彦(千葉大院) 館 幸男(原子力機構)	日本原子力学会2015年秋の大会	H38 p403	モンモリロナイトに吸着した <sup>133</sup> Cs のNMR パラメータと吸着構造の関係を明らかにするために、第一原理計算に基づいた <sup>133</sup> Cs NMR パラメータの理論計算を行った。四面体層のAl 置換サイト近傍に吸着した <sup>133</sup> Cs のケミカルシフトは、低磁場シフトすることが明らかとなった。	地層処分、セーフティケース、安全評価、FEP データベース、データセット



No.	PDF-No.	関連	発行年	和文標題	英文標題	著者名	資料名	巻号ページ(発行年月)	要約	キーワード
91	349	無	2015	第一原理計算と <sup>133</sup> Cs 固体核磁気共鳴法によるモンモリロナイトに吸着したCs 吸着構造の解析 (2) <sup>133</sup> Cs MAS および <sup>133</sup> Cs 3Q MAS NMR による構造解析	Structural analysis of Cs adsorption on Cs-montmorillonite using ab initio calculation and <sup>133</sup> Cs solid state NMR (2) <sup>133</sup> Cs MAS and 3QMAS NMR	岡本拓也、大窪貴洋、岩館泰彦(千葉大院) 出口健三、清水禎、大木忍(物材機構) 館 幸男(原子力機構)	日本原子力学会2015年秋の大会	H39 p404	Cs 置換率の異なるモンモリロナイトを調製し、 <sup>133</sup> Cs Magic angle spinning (MAS) NMRおよび <sup>133</sup> Cs Triple quantum (3Q)MASNMR測定を行った。理論計算から得られた <sup>133</sup> CsNMRパラメータと実測したスペクトルを比較することでピークの帰属を行いCs 吸着サイトの構造を検討した。	放射性廃棄物処分、性能評価、水理-物質移行-地球化学-力学連成モデル、解析プラットフォーム、FrontISTR
92	350	無	2015	福島原発事故で発生した廃棄物の合理的な処理・処分システム構築に向けた基盤研究;(39)ベントナイト中の陰イオンの拡散を支配する有効空隙率のイオン強度依存性	Basic Studies for Developing Rational Treatment and Disposal System of Radioactive Wastes Generated by Fukushima Dai-ich Nuclear Accident (39) Ionic strength dependence of effective porosity that governs diffusion of anion in bentonite	出光一哉、湯原 勝、小川由貴、稲垣八穂広、有馬立身(九大)	日本原子力学会2015年春の年会	B12 p48	福島原発事故で発生した廃棄物の処分において想定される高塩濃度の水溶液が、ベントナイト中の陰イオンの拡散を支配する有効空隙率に与える影響を調べた。	
93	351	無	2015	福島原発事故で発生した廃棄物の合理的な処理・処分システム構築に向けた基盤研究;(40)ベントナイト中のCs+の拡散に関する分子動力学計算	Basic Studies for Developing Rational Treatment and Disposal System of Radioactive Wastes Generated by Fukushima Dai-ichi Nuclear Accident (40) Molecular dynamic simulation of Cs+ diffusion in bentonite	小林春菜、Aric Newton、田中真悟、渡辺直子、小崎 完(北大)	日本原子力学会2015年春の年会	B13 p49	福島原発事故で発生した放射性廃棄物の処分の安全評価において粘土バリア材中のCs+の拡散挙動の理解が重要である。本研究では、分子動力学シミュレーションにより、モンモリロナイト層間中の、Na+、Cs+および水分子の拡散挙動を計算し、そのメカニズムを検討した。	
94	352	無	2015	ベントナイト中におけるプルトニウムの移行挙動に与えるpHの影響	Effect of pH on the Plutonium Migration Behavior in Compacted Bentonite	浜田 涼、出光一哉、前田範之、稲垣八穂広、有馬立身(九大) 秋山大輔、小無健司、渡部 信(東北大) 小山真一(JAEA)	日本原子力学会2015年春の年会	B22 p58	pHがベントナイト中におけるプルトニウムの移行挙動に与える影響について酸性白土混合ベントナイトを用いて拡散試験を行い調査した。	ベントナイト、拡散、ホウ素、イオン強度
95	353	有	2015	カリウムイオンが処分場ベントナイトに与える影響の検討;(1)K型化ベントナイトの膨潤特性および透水性	Study on the effects of potassium ion on the bentonite of the radwaste repository (1)The swelling capacity and permeability of K type bentonite	三好 悟、木村志照、甚野智子(大林組) 三歩一 孝、佐藤 努(北大) 柴田真仁(太平洋コンサルタント)	日本原子力学会2015年春の年会	B23 p59	Na 型ベントナイトを塩化カリウム溶液で処理してカリウムイオンを主な交換性陽イオンとするK型化ベントナイトを作製し、その特性を調べた結果、未処理のベントナイトに比べて膨潤能力が大幅に減少することがわかった。	ベントナイト、ホウ酸、拡散
96	354	有	2015	カリウムイオンが処分場ベントナイトに与える影響の検討;(2)KOH溶液による化学的変質挙動と空隙構造と透水性の変化	Study on the effects of potassium ion on the bentonite of the radwaste repository (2) Chemical alteration by KOH solution and the effect on pore structure and permeability	木村志照、三好 悟、甚野智子(大林組) 三歩一 孝、佐藤 努(北大) 柴田真仁(太平洋コンサルタント)	日本原子力学会2015年春の年会	B24 p60	圧縮K 型ベントナイトにKOH を通水し、化学的変質挙動、空隙構造と透水性の変化について試験を行った。アルカリによる溶解による密度低下および、モンモリロナイトの溶解およびイライト化により膨潤力が低下することで著しく透水性が増加することがわかった。	Ca 型ベントナイト、過飽和ケイ酸、析出挙動、温度影響
97	355	有	2015	Ca型ベントナイト混合土のガス移行特性に関する検討;(3)室内ガス移行試験結果に対する二相流パラメータ設定	Study on gas migration properties of Ca bentonite-sand mixture (3) Evaluation of two-phase flow parameters based on laboratory gas migration tests	山本修一、古賀和正(大林組) 新納史朗、熊谷 守(日本原燃)	日本原子力学会2015年春の年会	B25 p61	Ca 型ベントナイト混合土を対象として実施された室内ガス移行試験結果に対し、既往の逆解析手法を用いて材料の二相流パラメータの同定と試験の再現解析を行った。	ベントナイト、一次元除荷、モデル化
98	033	有	2016	処分孔設置方式における緩衝材流出に関する検討(その4;地下水流入に関する解析的検討)		瀧美博行、升元一彦(鹿島建設) 石井智子、城まゆみ(原環センター) 中山 雅、大野宏和(日本原子力研究開発機構)	土木学会第71回年次学術講演会(平成28年9月)	CS13-036, p71-72	高レベル放射性廃棄物地層処分施設において、処分孔への地下水流入は緩衝材の人工バリアとしての機能に影響を与えられ1)。これに関する検討の全体計画を(その1)で示した2)。本稿では処分孔への地下水流入を低減させるグラウト等の工学的止水対策の効果について、解析的検討を行った結果について報告する。現実的な検討を行うために、地下研究所等の実測調査データに基づき、割れ目をモデル化した水理地質構造モデルを構築することとし、割れ目ネットワークモデルによる解析的本研究では、(その1)で示したように、処分施設の人工バリアのうち緩衝材に着目して、施設閉鎖後から地下水が回復して施設が飽和するまでの期間(以下、再冠水時)に緩衝材で発生する現象の定量評価を進めている。特に、再冠水時の緩衝材の流出現象に関しては、小規模室内試験から、順次スケールアップし、原位置試験まで様々な締固め管理に用いられる締固め曲線(乾燥密度 $\rho_d$ と含水比 $w$ の関係)は、締固めエネルギーレベル(CEL)と土質に依存する。一般に現場施工におけるCEL は不明であり、名目上同一の土質を使用s していても、締固め曲線は施工中にばらつくと考えられる。これに対し、最大乾燥密度( $\rho_{dmax}$ )と最適含水比 $w_{opt}$ の状態に対応する飽和度	地層処分、セーフティケース、処分場概念、実用性
99	101	有	2016	処分孔設置方式における緩衝材流出に関する検討(その2;室内試験での緩衝材流出試験)		小林一三(鹿島建設) 横山 聡、石井智子、朝野英一(原環センター)	土木学会第71回年次学術講演会(平成28年9月)	CS13-034, p67-68	本研究では、(その1)で示したように、処分施設の人工バリアのうち緩衝材に着目して、施設閉鎖後から地下水が回復して施設が飽和するまでの期間(以下、再冠水時)に緩衝材で発生する現象の定量評価を進めている。特に、再冠水時の緩衝材の流出現象に関しては、小規模室内試験から、順次スケールアップし、原位置試験まで様々な締固め管理に用いられる締固め曲線(乾燥密度 $\rho_d$ と含水比 $w$ の関係)は、締固めエネルギーレベル(CEL)と土質に依存する。一般に現場施工におけるCEL は不明であり、名目上同一の土質を使用s していても、締固め曲線は施工中にばらつくと考えられる。これに対し、最大乾燥密度( $\rho_{dmax}$ )と最適含水比 $w_{opt}$ の状態に対応する飽和度	溶解度、温度依存性、トリウム、固相
100	102	有	2016	飽和度に着目した転圧試験結果の整理(その2)	An examination of compaction quality based on the degree of saturation observed in rolling compaction tests (Part 2)	岡本道孝、三上大道、小林一三、吉田輝、北本幸義、藤崎勝利(鹿島建設) 龍岡文夫(東京理科大学)	第51回地盤工学研究発表会 2016年9月	0390 D-09 p779-780	NUMO「緩衝材の設計要件」に関する考え方が報告されている	廃止措置技術、CO2レーザ、レーザ波長水吸収率、レーザ誘起気泡、超臨界水
101	201	有	2016	「(3)処分場の設計と工学技術」緩衝材の設計要件		窪田 茂(NUIMO)	NUMOセーフティーケースに関する外部専門家ワークショップ(2016年9月21日、大阪)資料-4 「(3)処分場の設計と工学技術」	P.4-18	NUMO「緩衝材の設計要件」に関する考え方が報告されている	ベントナイト、純水、海水、放射線分離、水素発生
102	202	有	2016	「(3)処分場の設計と工学技術」緩衝材の評価項目		窪田 茂(NUIMO)	NUMOセーフティーケースに関する外部専門家ワークショップ(2016年9月21日、大阪)資料-4 「(3)処分場の設計と工学技術」	P.4-19	NUMO「緩衝材の評価項目」に関する考え方が報告されている	コロイド、Np(V)、吸着、可逆・不可逆性
103	203	有	2016	「(3)処分場の設計と工学技術」設計要件を満足する緩衝材の仕様範囲		窪田 茂(NUIMO)	NUMOセーフティーケースに関する外部専門家ワークショップ(2016年9月21日、大阪)資料-4 「(3)処分場の設計と工学技術」	P.4-21	NUMO「設計要件を満足する緩衝材の仕様範囲」に関する考え方が報告されている	地層処分、ベントナイト、超音波
104	204	有	2016	「(3)処分場の設計と工学技術」許容できる緩衝材流出量の設定		窪田 茂(NUIMO)	NUMOセーフティーケースに関する外部専門家ワークショップ(2016年9月21日、大阪)資料-4 「(3)処分場の設計と工学技術」	P.4-83	NUMO「許容できる緩衝材流出量の設定」に関する考え方が報告されている	ベントナイト、一次元圧縮、浸透圧、膨潤、モデル化
105	205	有	2016	「(3)処分場の設計と工学技術」許容湧水量の基準値の設定		窪田 茂(NUIMO)	NUMOセーフティーケースに関する外部専門家ワークショップ(2016年9月21日、大阪)資料-4 「(3)処分場の設計と工学技術」	P.4-84	NUMO「許容湧水量の基準値の設定」に関する考え方が報告されている	カルシウムベントナイト、飽和方法、透水試験

No.	PDF-No.	関連	発行年	和文標題	英文標題	著者名	資料名	巻号ページ(発行年月)	要約	キーワード
106	206	有	2016	「(3)処分場の設計と工学技術」湧水量の設定(緩衝材の滴水対策の観点から)		窪田 茂(NUIMO)	NUMOセーフティーケースに関する外部専門家ワークショップ(2016年9月21日、大阪)資料-4「(3)処分場の設計と工学技術」	P.4-85	NUMO「湧水量の設定(緩衝材の滴水対策の観点から)」に関する考え方が報告されている	ベントナイト、カリウムイオン、セメント浸出液、リージョン1、イライト化、混合層、透水性、間隙構造
107	301	無	2016	燃料デブリの処分に向けた予察的な検討(2)ガスの発生とその影響	Preliminary Study for Disposal of Fuel Debris (2) Impact of gas generation on disposal system	西村優基、島田太郎、武田聖司(原子力機構)	日本原子力学会2016年秋の大会	1D07	福島第一原子力発電所事故により発生した燃料デブリをガラス固化体の地層処分と同様の処分概念で処分することを想定し、水の放射線分解及び金属腐食で発生するガスの影響に関して予察的な検討を行った。	高アルカリ溶液、モンモリロナイト、二次鉱物、pH緩衝性
108	302	有	2016	標準委員会セッション2「低レベル放射性廃棄物の埋設地に係る覆土の施工方法及び施設の管理方法」:201X改定標準案の概要について(1)標準改定の経緯、目的、標準全体概要の紹介	(1) The whole outline of the Revised AESJ Standard, The Revised process and purpose	新堀雄一(東北大学) 吉原恒一(原子力安全推進協会) 関口高志(戸田建設)	日本原子力学会2016年秋の大会	PL2C01	原子燃料サイクル専門部会及びLLW埋設後管理分科会では、2011年2月に発行された「低レベル放射性廃棄物の埋設地に係る埋戻し方法及び施設の管理方法:2010」の改定案を取りまとめた。本報文では、標準改定の経緯、目的、標準全体概要を紹介する。	Ca型ベントナイト、クニボンド、モンモリロナイト、溶解速度、干渉計
109	303	有	2016	標準委員会セッション2「低レベル放射性廃棄物の埋設地に係る覆土の施工方法及び施設の管理方法」:201X改定標準案の概要について(3)新規制基準に対応した主な標準改定内容について	(3) The main revise contents based upon the new Regulation Chap.5 Construction technique of the Cover-Soil and Chap.6 The measure which should be taken for the Safety Control	新堀雄一(東北大学) 吉原恒一(原子力安全推進協会) 関口高志(戸田建設)	日本原子力学会2016年秋の大会	PL2C03	原子燃料サイクル専門部会及びLLW埋設後管理分科会では、2011年2月に発行された「低レベル放射性廃棄物の埋設地に係る埋戻し方法及び施設の管理方法:2010」の改定案を取りまとめた。本報文では、新規制基準に対応した主な標準改定内容として、覆土の施工方法及び保安のために講ずべき措置を紹介する。	Ca型ベントナイト 過飽和ケイ酸 埋め戻し材 析出速度 高アルカリ地下水
110	304	無	2016	Am(III)および種々の価数を持つイオンのベントナイトコロイドに対する吸着における不可逆性評価	Investigation of sorption reversibility of Am(III) and the other nuclides on bentonite colloids	中田弘太郎(電中研) 石寺孝充(原子力機構) 黒澤精一、林雅則、別部光里、助川誠裕(検査開発)	日本原子力学会2016年秋の大会	2D01	ベントナイトコロイドに吸着したAm(III)に対して、逐次脱離試験を実施した。6回の脱離試験を繰り返した後も4.5×10 <sup>-10</sup> mol/gコロイドのAmがコロイドに留まったことから、この量のAmがベントナイトコロイドに対して不可逆的に吸着している可能性が高いと考えられた。	ベントナイト、モンモリロナイト、塩強度、拡散、陰イオン
111	305	無	2016	原位置試験により鉄と長期間接触させたクニゲルV1試料の変質挙動の調査	Investigations of mineral alteration in Kunigel V1 samples contacted with iron obtained from long-term in-situ experiments	石寺 孝充、笹本 広(原子力機構) 佐藤 久夫(三菱マテリアル)	日本原子力学会2016年秋の大会	2D11	原位置において鉄と長期間接触させたクニゲルV1試料中の鉱物の変質挙動について調査した。その結果、生成量は微量であるものの、パーチェリン、鉄クロライト、鉄サポナイトが生成していることが推定され、また、鉄とクニゲルV1試料の接触界面に、石膏とカルサイトの生成が確認された。	高レベル放射性廃棄物、地層処分、回収可能性、緩衝材除去技術、塩水、実規模スケール試験
112	306	無	2016	超音波を用いた不飽和圧縮ベントナイト中含水比計測に関する研究	A Study of Water Content Measurement by Ultrasound in Compacted Bentonite under Unsaturated Condition	木村 駿、北山一美、木倉宏成(東京工業大学) 木本和志、河村雄行(岡山大学)	日本原子力学会2016年秋の大会	2D12	高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材ベントナイトの再冠水時の水分浸潤挙動解明研究の一環として、超音波を用いたベントナイト中水分量計測手法の開発を行っている。本研究では、不飽和圧縮ベントナイト中の含水比を計測する手法について、超音波伝搬速度計測による実験的な検討を行った。	高レベル放射性廃棄物、地層処分、回収可能性、緩衝材除去技術、装置開発、実規模スケール試験
113	307	無	2016	分子動力学法によるモンモリロナイト層間の膨潤特性評価	Swelling Properties of Montmorillonite Clay Minerals from Molecular Dynamics Method	四辻健治1、館 幸男(原子力機構) 河村雄行(岡山大学)	日本原子力学会2016年秋の大会	2D14	放射性核種の移行経路の一つと考えられる粘土鉱物層間の膨潤挙動とその安定性を評価するため、モンモリロナイト層間を対象に、鉱物の層電荷と対イオンのバリエーションを考慮して、層間の水分子数に対する底面間隔および系の混合過剰エンタルピーの挙動を、分子動力学法を用いて評価した。	高レベル放射性廃棄物、地層処分、回収可能性、実規模スケール試験、緩衝材除去技術、塩水
114	308	無	2016	TRU廃棄物処分システムにおけるベントナイト系材料の2相流パラメータ同定と適用性検証	A validation study on two-phase flow parameter identification of bentonite in TRU waste disposal system	佐伯亜由美、田原康博(地圏環境テクノロジー) 古賀和正、大和田仁(原環センター) 佐藤 伸(大林組)	日本原子力学会2016年秋の大会	2D15	TRU廃棄物処分システムにおけるベントナイト系材料を対象とし、室内試験と逆解析手法を組み合わせることで、ガス移行挙動評価で重要となる2相流パラメータの同定・蓄積を進めてきた。さらに、既往の室内試験とは条件等が異なる複数のガス移行試験に対して、同定・蓄積されたパラメータを適用することにより、試験データを良好に再現することができ、これまで不明確であった2相流パラメータの不確実性の幅が絞り込ま	高レベル放射性廃棄物、地層処分、回収可能性、3Dシミュレーション、実規模スケール試験、緩衝材除去
115	309	有	2016	Na型ベントナイトへの過飽和ケイ酸の析出挙動	Deposition behavior of supersaturated silicic acid on Na-type bentonite	笹川 剛、千田太詩、新堀雄一(東北大学)	日本原子力学会2016年秋の大会	2D16	本研究では、セメント使用に起因するpH勾配によって生じる過飽和ケイ酸が処分坑道埋め戻し部のベントナイトへ析出する想定を基に、実験にて有意なケイ酸析出を確認するとともに析出速度定数を定量化した。	Horonobe URL project, in-situ experiment, engineered barrier, sedimentary rock, buffer material, backfill material, concrete plug
116	310	無	2016	鉄共存系での圧縮ベントナイト中におけるプルトニウムの15年間の移行挙動	15 years Plutonium Migration Behavior in Compacted Bentonite with Iron	大久保徳弥、出光一哉、稲垣八穂広、有馬立身(九州大学) 秋山大輔、小無健司(東北大学)	日本原子力学会2016年秋の大会	2D17	炭素鋼とベントナイトを接触させ、その接触面にプルトニウム238溶液を塗布して約15年間拡散実験を行いその挙動を評価した。	第一原理計算、GIPAW計算、核磁気共鳴(NMR)、Cs型モンモリロナイト
117	311	無	2016	人工および天然バリア材におけるヨウ化物イオンの拡散挙動	Diffusion of Iodide Ions in Engineered and Natural Barrier Materials	北城諒一、田中真悟、渡邊直子、小崎完(北海道大学) 赤木洋介(三菱マテリアル) 武田匡樹(原子力機構)	日本原子力学会2016年秋の大会	2D18	人工および天然バリア材におけるヨウ化物イオンの見かけの拡散係数および拡散の活性化エネルギーを決定した。ヨウ化物イオンの拡散機構は、モンモリロナイト部分密度によって変化することが明らかとなった。	Cs型モンモリロナイト、層間イオン、133Cs固体NMR、第一原理計算
118	312	無	2016	モンモリロナイトに吸着した水和Csの構造	Structure of hydrated Cs on montmorillonite	岡本拓也、大窪貴洋、岩館泰彦(千葉大院) 出口健三、清水 禎、大木 忍(物材機構) 館 幸男(原子力機構)	日本原子力学会2016年秋の大会	2D19	含水率の異なるCs型モンモリロナイトを調製し、133Cs Magic angle spinning (MAS) NMR測定を行い水和に伴うCsの吸着構造の変化を検討した。	ベントナイト、塩強度、有効空隙率、拡散、陰イオン
119	313	無	2016	燃料デブリの処分に向けた予察的な検討(1)バリア機能に着目した感度解析	Preliminary study for disposal of fuel debris (1) Sensitivity analysis on safety functions of engineered and natural barriers	島田太郎、西村優基、武田聖司(原子力機構)	日本原子力学会2016年秋の大会	1D06	東京電力福島第一原子力発電所で発生した燃料デブリの処分に向け、燃料デブリ特性の不確実性とそれによるバリア性能への影響の不確実性に着目した感度解析を行った。	放射性廃棄物処分、ベントナイト、セシウム、拡散、分子動力学シミュレーション
120	314	有	2016	地層処分セーフティーケース	Development of Safety Case for geological disposal	藤山哲雄、太田久仁雄、鈴木 覚、藤崎 淳、出口 朗、梅木博之(NUMO)	日本原子力学会2016年秋の大会	PL2D01, PL2D03, PL2D04	東北地方太平洋沖地震ならびに東京電力福島第一原子力発電所事故の発生等を踏まえ、「第2次取りまとめ」[1]により示されたわが国における地層処分の技術的信頼性を再評価することが求められている。一方、国が科学的有望地を示す方針[2]が決定されたことで、処分地選定が新たな局面を迎えつつあり、サイト選定の進展に即応可能な技術の整備状況を示すことは、以前にも増して重要となっている。これらを踏ま	ベントナイト、プルトニウム、移行
121	317	無	2016	NMR緩和法による飽和モンモリロナイトの空隙構造解析	Pore distribution of water-saturated compacted clay using NMR relaxometry	山崎秋雄、大窪貴洋(千葉大院) 岩館泰彦、館 幸男(原子力機構)	日本原子力学会2016年秋の大会	2D13	1H NMRで観測される水分子の緩和時間と凍結温度が空隙サイズに依存することを利用して、飽和圧縮モンモリロナイトの層間と粒子間空隙の定量を試みた。	K型ベントナイト、圧縮ベントナイト、変質、カリウムイオン、膨潤性、透水性



No.	PDF-No.	関連	発行年	和文標題	英文標題	著者名	資料名	巻号ページ(発行年月)	要約	キーワード
122	318	無	2016	自然災害に対する操業期間中の地層処分施設の安全対策 人工バリアに対する火災影響評価の検討	Safety measures of HLW geological disposal facility during an operation period against natural disaster Evaluation for impact of fire hazard for engineered barrier	山川浩光、蓮井昭則、川久保政洋、朝野英一(原環センター) ディアクリーヘルマン、高倉大典、岩田裕美子、川上 進 (IHI)	日本原子力学会2016年秋の大会	2D22	地層処分場の処分坑道において自然災害を起因とした廃棄体の位置・搬送装置の火災を想定し、火災解析結果を基に伝熱解析と応力解析から人工バリアに対する火災影響を評価した。	K型ベントナイト、圧縮ベントナイト、変質、アルカリ溶液、カリウムイオン、透水性
123	319	無	2016	「ガラス固化体の実力は?—地層処分におけるガラス固化体性能評価の現状—」 (1)ガラス固化体の実力は?—性能評価の観点から—	(1) In an aspect of performance assessment	大江俊昭(東海大学)	日本原子力学会2016年秋の大会	PL3F01	我が国における地層処分の実現可能性を論じた第2次取りまとめ(取りまとめ)では、ガラス固化体は処分後約7万年で全量が溶解するとしている。しかし、7万年では <sup>135</sup> Csや <sup>237</sup> Npなどの長半減期核種を隔離することは覚えず、そのためか、その後固化体性能に関する研究開発は停滞していたといっても過言ではない。一方、取りまとめ地層処分システムの安全評価におけるソースタームのうち、高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)からのCs-135などの可溶性放射性核種の放出率は、ガラス固化体の長期溶解速度により制限されるため[1]、現実的で信頼性の高いガラス固化体の溶解モデルの開発が必要である。「ガラス固化体の実力」はこの溶解モデルにより示すことができる。ガラス固化体近傍の溶存ケイ酸濃度は、処分環境におけるガラス固化	低レベル放射性廃棄物処分、Ca型ベントナイト混合土、ガス移行、二相流パラメータ
124	320	無	2016	「ガラス固化体の実力は?—地層処分におけるガラス固化体性能評価の現状—」 (5)ガラス固化体の実力は?—日本の研究の現状と課題—	(5) Current Japanese studies and future plan	三ツ井 誠一郎(原子力機構)	日本原子力学会2016年秋の大会	PL3F05	二酸化ウランおよび使用済燃料の水溶液に対する溶解速度(燃料溶解速度)について、水溶液中の全炭酸濃度が及ぼす影響を文献調査によりレビューした。溶解速度の値は不活性雰囲気と還元雰囲気と異なっており、直接処分環境である還元雰囲気のデータが不足していることが明らかにされた。	放射性廃棄物処分、ベントナイト混合土、ミストブレンダー工法、縦落し混合・加水装置、吹付け施工
125	321	無	2016	使用済燃料直接処分のソースターム評価:(2)二酸化ウランおよび使用済燃料の溶解速度に及ぼす炭酸濃度の影響に関するレビュー	Estimation of source term for spent fuel disposal: (2) Effect of carbonate concentration on dissolution rate of UO <sub>2</sub> and spent fuel – A review	北村 暁(原子力機構) 赤堀邦晃(三菱マテリアル)	日本原子力学会2016年秋の大会	3D03	NUMO セーフティケースにおいて閉鎖後長期の安全評価を実施するにあたり、シナリオ設定の論拠情報整備の一環として、OECD-NEAの国際FEPリストやFEP-CATを基にNUMO-FEPデータベースを作成した。また、安全評価解析において要する核種の溶解度、拡散係数、分配係数に関する核種移行データの設定について示す。	透水性、化学的緩衝性、再冠水、ベントナイト、アルカリ性地下水
126	322	有	2016	NUMO セーフティケースの開発(6)FEPデータベースの開発と安全評価におけるデータセット	Development of the NUMO Safety Case (6) Development of FEP-database and setting datasets for safety assessment	黒澤 進、浜本貴史、澁谷早苗、石田圭輔、藤本秋恵、稲垣 学、藤崎 淳、石黒 彦、塚本 政樹(NUMO)	日本原子力学会2016年春の年会	1E06	放射性廃棄物処分場で発生する水理-物質移行-地球化学-力学現象を扱う連成解析プラットフォームを開発した。地球化学-水理-物質移行連成、及び、ベントナイト膨潤解析コードを、オープンソース解析システムFrontISTRに搭載して、ベントナイト膨潤及び間隙水中の地球化学反応の連成現象の解析を行った。	オキシ陰イオン、ベントナイト、拡散
127	323	無	2016	放射性廃棄物処分場の水理-物質移行-地球化学-力学連成解析 プラットフォームの開発	The development of analysis platform of hydro-transport-chemical-mechanical coupling model for radioactive waste repository	辻本恵一、高沢真由美、山口耕平(三菱マテリアル) 橋本 学、奥田洋司(東京大学)	日本原子力学会2016年春の年会	1E07	福島第一原発の廃炉のためには新たな科学的知見の取得と新概念に基づく処理・処分法の研究・開発が必要である。「福島第一原発事故において発生した廃棄物の合理的な処理・処分システム構築に向けた基盤研究」においては、廃棄物性状評価、廃棄物処理ならびに廃棄物処分の研究を様々な角度から進めている。処分研究として、従来と異なる廃棄物が処分に与える影響について実験的に検討を行ってきた。本報告では、高塩濃度環境におけるベントナイト中の核種の移行挙動およびコンクリート	ベントナイト、拡散、陽イオン、HTO、活性化エネルギー
128	324	無	2016	総合講演・報告4「福島原発事故で発生した廃棄物の合理的な処理・処分システム構築に向けた基盤研究」 (1)本研究の背景と目的	Basic Studies for Developing Rational Treatment and Disposal System of Radioactive Wastes Generated by Fukushima Dai-ichi Nuclear Accident (1) Background and Objectives of This Study	池田泰久、竹下健二(東工大) 小崎完、佐藤努(北大) 桐島陽、佐藤修彰、新堀雄一、三村均(東北大) 鈴木達也(長岡技科大)	日本原子力学会2016年春の年会	OV0401		地層処分、性能評価、不確定性解析、ラテン超方格サンプリング法、PHREEQC、収着分配係数
129	325	無	2016	総合講演・報告4「福島原発事故で発生した廃棄物の合理的な処理・処分システム構築に向けた基盤研究」 (4)廃棄物処分研究の成果—高塩濃度及び従来と異なる廃棄物が処分に与える影響評価—	Basic Studies for Developing Rational Treatment and Disposal System of Radioactive Wastes Generated by Fukushima Dai-ichi Nuclear Accident (4) Results of Studies on Radioactive Waste Disposal – Evaluation of Effects of Uncategorized	出光一哉(九大) 小崎 完、佐藤 努(北大) 新堀雄一(東北大)	日本原子力学会2016年春の年会	OV0404	福島第一原発の廃炉のためには新たな科学的知見の取得と新概念に基づく処理・処分法の研究・開発が必要である。「福島第一原発事故において発生した廃棄物の合理的な処理・処分システム構築に向けた基盤研究」においては、廃棄物性状評価、廃棄物処理ならびに廃棄物処分の研究を様々な角度から進めている。処分研究として、従来と異なる廃棄物が処分に与える影響について実験的に検討を行ってきた。本報告では、高塩濃度環境におけるベントナイト中の核種の移行挙動およびコンクリート	幌延深地層研究計画、原位試験、人工バリア、堆積岩、計測計画
130	326	無	2016	福島原発事故で発生した廃棄物の合理的な処理・処分システム構築に向けた基盤研究 (55)ベントナイト中のホウ素の拡散に対する塩強度の影響	Basic Studies for Developing Rational Treatment and Disposal System of Radioactive Wastes Generated by Fukushima Dai-ichi Nuclear Accident (55) Ionic strength dependence of boron diffusion	小川由貴、出光一哉、浜田 涼、大久保徳弥、稲垣八穂広、有馬立身(九州大学)	日本原子力学会2016年春の年会	2F01	種々の条件でベントナイト中にホウ酸を拡散させた結果、ベントナイト中でホウ酸の拡散が遅延されたことがわかり、ホウ酸の拡散が陰イオン排除効果や分配係数と関連している可能性が示唆された。	ウランイオン、炭酸イオン、拡散、モンモリロナイト、分子動力学シミュレーション
131	327	無	2016	ベントナイト中でのホウ酸の拡散	Diffusion of Boric Acid in Bentonite	遠藤慶太、大井隆夫(上智大学) 高橋宏明(原子力規制庁)	日本原子力学会2016年春の年会	2F11	本研究では、流路閉塞による核種移行抑制が期待されるCa型ベントナイトへの過飽和ケイ酸の析出について、深地層の温度影響を考慮した析出速度定数を実験的に評価した。その結果、温度上昇によってCa型ベントナイトへの過飽和ケイ酸の析出が促進されることを実験により明らかにした。	埋め戻し材、ベントナイト、すき間、ベレット、PEM、遠隔操作
132	328	有	2016	地層処分場周辺の温度条件におけるCa型ベントナイトに対する過飽和ケイ酸析出挙動の評価	Evaluations of deposition behavior of supersaturated silicic acid on Ca-type bentonite under the temperature condition around geological disposal system	笹川 剛、千田太詩、新堀雄一(東北大学)	日本原子力学会2016年春の年会	2F12	応力の変化に伴う微視的な構造の変化を考慮した弾塑性モデルにより、締固めた飽和ベントナイトの一次元除荷・再載荷時の応力・ひずみ挙動を再現できることを明らかにした。	浅地中処分、核種、分配係数、ベントナイト、安全評価
133	329	無	2016	微視的な構造の変化を考慮した弾塑性モデルによる締固めたベントナイトの一次元除荷・再載荷挙動のシミュレーション	Simulation of one-dimensional un-loading and re-loading behavior of compacted bentonite by elasto-plastic model considering microstructure change	田中幸久、渡邊保貴(電中研)	日本原子力学会2016年春の年会	2F13	地層処分のセーフティケースの開発にあたり、サイト選定において想定される現実的な地質環境モデルを対象として、体系的な処分場設計の方法論とそれを実現するための建設・操業・閉鎖の工学技術を具体的に提示しその適用性を論ずる。これによって、第2次取りまとめ[1]以降の技術開発により、安全な処分場の実現に必要な工学技術が着実に整備されていることを示す。	亜セレン酸、拡散の活性化エネルギー、ベントナイト、塩強度
134	330	有	2016	NUMO セーフティケースの開発 (3)処分場の設計と工学技術	Development of the NUMO Safety Case (3) Repository design and engineering	鈴木 覚、藤崎 淳、山本陽一、窪田 茂(NUMO)	日本原子力学会2016年春の年会	1E03	25°C、40°C 及び60°C の温度条件下で振とうした4価トリウム水酸化物の溶解度を測定するとともに、X線回折法を用いて固相状態の変化を調べ、熱力学データに基づいて溶解度の温度影響を解釈した。	放射性廃棄物、Cs、ベントナイト、塩濃度、拡散係数、活性化エネルギー、収着エンタルピー
135	331	無	2016	Th水酸化物溶解度および固相状態に及ぼす温度影響の解釈	Interpretation of temperature effect on the solubility and solid phase of thorium hydroxide	西川将吾、小林大志、佐々木隆之(京都大学)	日本原子力学会2016年春の年会	1E14		福島第一原子力発電所、汚染水、止水、ベントナイト、ベレット



<添付資料 B>

論文シート

緩衝材機能に係る文献調査 (1)

1.番号	No.021
2.文献名	緩衝材の再冠水挙動評価 (1) ベントナイト系人工バリアの再冠水時の挙動および品質評価
3.執筆者	鈴木圭、朝野英一、小林一三
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計・施工】乾燥密度の異なるベントナイトが混在する場合には、再冠水後も乾燥密度の差が残り、応力履歴の違いによっても乾燥密度の差が生じるため、材料の選定及び施工法の選択にあたっては留意が必要である。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象： 乾燥密度、応力履歴の異なる緩衝材は再冠水後も密度差が残るという現象は、有効ベントナイト乾燥密度と1次元圧密試験との<math>e\text{-log}P</math>関係から次のように説明される。すなわち、高密度部は膨潤により、平行移動した膨潤線をたどって下降し、低密度部は高密度部の膨潤により圧密線を辿って上昇する。両者は互いに有効乾燥密度が等しくなる方向に向かうが、圧密圧力が等しくなるところで平衡状態に達し、両者には乾燥密度差が存在する。</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Ca型、Na型ベントナイトを試験に使用（詳細表記なし）</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	日本原子力学会2011年秋の大会、B31
9.その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Ca型/Na型ベントナイトは、通水する液種によって膨潤圧が異なることが確認された。また、Na型ベントナイトについては初期に蒸留水で通水すると透水係数が低くなり、液種が蒸留水から<math>\text{CaCl}_2</math>に変化してもその傾向が変わらないことが確認された。</li> <li>・緩衝材も圧密圧力の釣合う点で、変形が止まるという力学に則した説明が可能となった。有効ベントナイト密度と圧密圧力の関係を示す<math>e\text{-log}P</math>関係から、同じ圧密圧力になる有効ベントナイト乾燥密度が求められる。</li> </ul>

緩衝材機能に係る文献調査 (2)

1.番号	No.022
2.文献名	小型化地中無線モニタリング装置の開発と緩衝材ブロックへの設置方法の検討
3.執筆者	奥津一夫, 高村尚, 戸井田克, 小林一三, 藤澤惣, 須山泰宏, 江藤次郎, 吉村公孝, 田辺博三
4.設計・施工への反映すべき知見	<p>【施工】吹付ベントナイト工法の適用により、緩衝材内部にモニタリング装置を設置する際に考えられる下記の課題を有効に解決できることを確認した。</p> <p>①計測器設置のために緩衝材を切削することによる緩衝材の緩み</p> <p>②計測器自体の存在による部分的性能低下</p> <p>③計測器設置後の計測器周りの緩衝材の締固め不足</p> <p>④ケーブルを配線することによる緩衝材貫通部の形成</p>
5.考慮すべき項目に関する記載内容	—
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<p>・吹付ベントナイト工法を用いて、緩衝材ブロック（実物大1/4 リング、高さ50cm）を製作し、モニタリング装置周りの緩衝材が均質に製作できており、かつ所定の乾燥密度（1.6Mg/m<sup>3</sup>）を満足していることを確認した。</p>
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	日本原子力学会2010年秋の大会、C46
9.その他	<p>小型化地中無線モニタリング装置の設置前から設置後にわたり緩衝材ブロック中の温度を正確に計測及び通信できることに加え、緩衝材ブロックの解体後、小型化地中無線モニタリング装置周りの緩衝材が均質に製作できており、かつ、所定の乾燥密度（1.6Mg/m<sup>3</sup>）を満足していることが確認された。</p>

緩衝材機能に係る文献調査 (3)

1.番号	No.025
2.文献名	緩衝材の再冠水挙動評価 (5) EBS 設計・施工仕様設定のための基盤研究
3.執筆者	鈴木圭、矢萩良二、朝野英一、小林一三
4.設計・施工への反映すべき知見	<p>【設計・施工】</p> <p>緩衝材の施工方法に起因する密度分布（密度差）やパイピング・エロージョンといった事象が人工バリアの長期性能に影響を与える可能性があることを受けて、人工バリアの設計・施工仕様設定に向けた基盤研究計画を提示した。</p>
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<p>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：</p> <p>－ 1 処分孔当たりへの地下水流量が0.1 L/minであるとエロージョンによって緩衝材が処分孔外に流出することにより、設計で規定される乾燥密度を満足しない可能性が高い。</p> <p>－ クニゲルV1 70wt%+ケイ砂30wt%の緩衝材ブロックに、海水に相当する0.5M NaClが浸入すると水みちにケイ砂が堆積し、その部分は流量が0.1mL/minになっても自己修復せず、核種の移行を抑制することが困難となる可能性がある</p>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	—
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	日本原子力学会2013年秋の大会、O56、p723
9.その他	<p>エロージョンに対する工学的対策として以下の必要性を提示</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ペレットと緩衝材ブロックの併用によるエロージョン抑制機能の確認</li> <li>・現場締め固め工法、または吹付け工法によるエロージョン抑制機能の確認</li> <li>・人工注水によるエロージョン抑制機能の確認</li> <li>・処分孔に仮設プラグを設置した場合の効果の確認</li> <li>・クニゲルV1の含有量を高める効果の確認</li> <li>・Ca型ベントナイトの塩水環境での性能の確認</li> <li>・グラウト工法等による地下水マネジメントの検討</li> </ul>

緩衝材機能に係る文献調査 (4)

1.番号	No.027
2.文献名	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
3.執筆者	竹内伸光、鈴木圭、朝野英一、小林一三
4.設計・施工への反映すべき知見	<p>【設計】</p> <p>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(パイピング)、浸食(エロージョン)が発生し、ベントナイトの自己修復作用を妨げる場合は長期性能に影響を与える可能性があるため、設計上の留意が必要となる。</p>
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<p>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：小規模試験の結果として、例えば以下のような知見が得られた</p> <p>－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。</p> <p>－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水みちが形成された。</p> <p>－流量一定条件での水みちが閉塞される流量は 0.001 l/分であった。</p>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	試験に使用した供試体は、ケイ砂30wt%混合、乾燥密度1.6Mg/m <sup>3</sup> のベントナイトブロック
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	日本原子力学会2013年秋の大会、O58、p725
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (5)

1.番号	No.030
2.文献名	ベントナイト系人工バリアへの地下水浸潤状況の評価
3.執筆者	小林一三、笹倉剛、朝野英一、鈴木圭
4.設計・施工への反映すべき知見	<p>【設計】</p> <p>施設の再冠水過程で不飽和ベントナイト系人工バリアに発生する事象のうち地下水の浸潤状況に着目し、一次元浸潤試験を実施した。その結果、不飽和状態のベントナイト系人工バリアへの浸潤フロントの経時変化を取得し、その浸潤状況を数式でモデル化した。</p>
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<p>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：</p> <p>一次元浸潤試験における供試体内の地下水浸潤状況を比抵抗計測値から定量化した。</p>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<p>試験に使用した供試体は、φ50mm×H1000 mm で乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>、乾燥質量比で30%のケイ砂を含むNa 型ベントナイト混合土</p>
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	鹿島技術研究所年報 第 62 号 2014 年 9 月 30 日
9.その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・一次元と見なせる条件での浸潤試験において、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、蒸留水のケースでは、浸潤フロントの位置 <math>d(\text{mm})</math>は、給水時間 <math>t(\text{day})</math>の指数関数として <math>d=60t^{0.35}</math> で近似できた。NaCl 水溶液の場合は、<math>d=14t^{0.5}</math> と近似でき、浸潤が毛細管現象としてモデル化できることが示された。</li> <li>・飽和度が初期値から 95%増加した時点を飽和フロントと見なした場合、蒸留水のケースでは、<math>d=0.6(t-590)^{0.5}</math>、NaCl 水溶液のケースでは <math>d=1.15(t-80)^{0.5}</math> で近似できる。</li> <li>・浸潤フロントと飽和フロントの差が、蒸留水の方が NaCl 水溶液より大きくなる原因は、NaCl 水溶液の場合、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。</li> <li>・比抵抗計測は、緩衝材に接触している電極間に電流を流し、その電極間の抵抗値を計測するものである。この抵抗は、電極間の緩衝材の飽和度が大きい程小さくなるため、飽和度と比抵抗の関係を取得すれば、比抵抗計測から飽和度の変化を推定することが可能となる。</li> <li>・比抵抗値と飽和度の関係の近似式として、並列回路モデルではなく、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以</li> </ul>

下のように決定した。

$$R=a(\rho d/\rho w/Sr)^{2.2}=a\{Gs/Sr(1+e)\}^{2.2}$$

ただし、 $d$  は乾燥密度、 $w$  は間隙液の単位体積質量、 $Sr(\times 100\%)$  は飽和度、 $e$  は間隙比、 $Gs$  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ッティングから蒸留水の場合は 1.0、0.5M の NaCl 水溶液の場合 0.6 となった。



緩衝材機能に係る文献調査 (6)

1.番号	No.031
2.文献名	Experimental investigations of piping phenomena in bentonite-based buffer materials for an HLW repository
3.執筆者	K. SUZUKI, H. ASANO, R. YAHAGI, I. KOBAYASHI, P.SELLIN, C. SVEMAR, M. HOLMQVIST.
4.設計・施工への反映すべき知見	<p>【設計】</p> <p>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(パイピング)、浸食(エロージョン)が発生し、ベントナイトの自己修復作用を妨げとならないよう、設計上の配慮が必要となる。</p>
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象:緩衝材への通水試験として小規模試験及び長尺試験を実施し、結果として以下のような知見が得られた。</li> <li>－大小の径の混合ペレット(100%クニゲルV1)では、蒸留水の流量が0.005 L/分以上でパイピング及びエロージョンが生じた。</li> <li>－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。</li> <li>－ブロックをペレットに隣接させた場合、ペレットとブロックの境界に水みちは発生しなかった。</li> <li>－水みちが閉塞される流量は0.001 L/分以下であった。</li> <li>－水の流量とエロージョン量の関係をSKBが取得したMX80のデータと比較すると、クニゲルV1は、同一流量の条件で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。</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	試験に使用した供試体は、クニゲルV1 30wt%、ケイ砂30wt%混合のNa型ベントナイトブロック、およびクニゲルV1 100wt%のペレット
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	2013The Mineralogical Society Clay Minerals, (2013) 48, 363–382
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (7)

1.番号	No.33
2.文献名	処分孔縦置き方式における緩衝材流出に関する検討(その4;地下水流入に関する解析的検討)
3.執筆者	渥美博行、升元一彦、石井智子、城まゆみ、中山雅、大野宏和
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計・施工】 処分孔への地下水流入を低減させるグラウト工等の対策について、解析的検討を行った。処分孔周辺1.5mの範囲の透水性を低減することによる、地下水流入量の低減効果を定量的に確認した。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	—
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	—
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	土木学会第71回年次学術講演会(平成28年9月) CS13-036, p71-72
9.その他	<p>処分孔への地下水流入量が0.1L/min以下となることを目安としている。</p> <p>幌延地下研究所のデータを用い、原位置の湧水量と工学的対策の効果について、解析的に評価した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・作成された割れ目ケースは10ケースで、平均77,813枚で、設定した3次元割れ目密度と整合している。</li> <li>・結果として10ケースで、平均8.411L/分であり、調査坑道からの実測値100m当たり、10.73L/分とほぼ、同程度であった。</li> <li>・割れ目データは、幌延URLの350m坑道の内、西連絡坑と東連絡坑の調査データを利用した。</li> <li>・水理データは、換気塔立坑近傍の調査ボーリングから得た水理調査結果を利用した。</li> <li>・掘削影響範囲の設定は、350m坑道の試験結果を利用した。</li> </ul>

緩衝材機能に係る文献調査 (8)

1.番号	No.101
2.文献名	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2 ; 室内試験での緩衝材流出試験)
3.執筆者	小林一三、横山 聡、石井智子、朝野英一
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】 再冠水時の緩衝材の流出現象に対する検討のうち、工学規模流出試験の試験結果を報告。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材に生じる挙動に関する事象：パイピングおよびエロージョン
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	・ケイ砂を 30wt.%含む Na 型ベントナイト、その乾燥密度は膨潤後に外周部の隙間を埋めた状態で 1.6Mg/m <sup>3</sup> 程度となるように設定。
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	土木学会第 71 回年次学術講演会(平成 28 年 9 月) CS13-034, p67-68
9.その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・再冠水時の緩衝材の流出現象を定量評価できれば、再冠水後の緩衝材の性能 (長期性能評価用の初期値) を推定することが可能となり、これにより閉鎖時の緩衝材が満たすべき性能を、長期性能を考慮して提示できる。</li> <li>・緩衝材の流出現象に対する工学的対策として、緩衝材と岩盤との間に人工不陸を設置することが有効であった</li> </ul>

緩衝材機能に係る文献調査 (9)

1.番号	No.102
2.文献名	飽和度に着目した転圧試験結果の整理 (その2)
3.執筆者	岡本道孝、三上大道、小林一三、吉田 輝、北本幸義、藤崎勝利、龍岡文夫
4.設計・施工への反映すべき知見	<p><b>【施工】</b></p> <p>盛土の締固め方法として、<math>\rho_d</math> (乾燥密度) と <math>S_r</math> (飽和度) の測定値に基づいて締固め状態と品質を評価する方法が提案されている。この方法の適用について、文献No.106と同様に、大径礫を含む岩砕材に関する転圧試験データを整理した。この方法は、所定の締固め品質を得るのに必要なCEL (締固めエネルギー) の推定に有効であると判断された。</p>
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材の施工方法：転圧施工
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	—
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	第 51 回地盤工学研究発表会 2016 年 9 月 0390 D-09 p779-780
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (10)

1.番号	No.104
2.文献名	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
3.執筆者	小林一三、大和田 仁、 林 大介
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】 ベントナイト系人工バリアの化学的な変質を考慮した止水性能評価モデル (Kozeny-Carman則)、及びそのモデルで必要となるパラメータ：比表面積の取得方法について示されている。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材の特性評価方法：Kozeny-Carman則 (KC則) を適用した透水係数と比表面積 (「その場X線解析 (XRD)」による)、乾燥密度の関係
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	・ベントナイト系人工バリアの止水性能 (低透水性) の評価モデル化としてKC則を適用
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	土木学会第 70 回年次学術講演会(平成 27 年 9 月) CS12-025, p49-50
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (11)

1.番号	No.106
2.文献名	飽和度に着目した転圧試験結果の整理
3.執筆者	岡本道孝、小林一三、吉田 輝、北本幸義、三上大道、藤崎勝利、龍岡文夫
4.設計・施工への反映すべき知見	<p><b>【施工】</b></p> <p>盛土の締固め方法として、<math>\rho d</math> (乾燥密度) と<math>Sr</math> (飽和度) の測定値に基づいて締固め状態と品質を評価する方法が提案されている。この方法の適用について、室内締固め試験と転圧試験の結果に基づいて検討した結果、CEL (締固めエネルギー) と締固め曲線 (土質) がばらついても、<math>\rho d</math>と<math>Sr</math>の実測値から真の締固め度を推定して現場施工におけるCEL の評価が可能となることが示された。この結果は、所定の締固め品質を得るのに必要な施工仕様の検討に有用である。</p>
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材の施工方法：転圧施工
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	—
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	第 50 回地盤工学研究発表会 2015 年 9 月 503 D-09 p1005-1006
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (12)

1.番号	No.107
2.文献名	湿式吹付け工法による高密度締固め土の構築技術 (SHOTCI、AY工法)
3.執筆者	小林一三、石井健嗣、笹倉 剛
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】 狭隘箇所においても均質、かつ高密度なベントナイトの締固め土を構築可能な施工法として開発された湿式吹付工法 (SHOTCLAY工法) について紹介。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材の施工方法：吹付け工法
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・粗砕ベントナイトを目標乾燥密度<math>1.6\text{Mg}/\text{m}^3</math>となるように施工した振動転圧工法と吹付工法との比較を実施</li> <li>・吹付け工法では、試験施工で吹き付けた飽和度から、含水比が変化した場合の乾燥密度も等飽和度線から推定することが可能。</li> <li>・モーターで駆動するファクトリーオートメーション (FA) 用ロボットによる自動吹付け施工を実施し、高さ8m、幅1mの高品質なベントナイト系人工バリアが構築可能。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	地盤工学会誌 63-3 (686) p24-25
9.その他	・リバウンド材は回収し、フレッシュな材料と混合して再利用が可能。



緩衝材機能に係る文献調査 (13)

1.番号	No.109
2.文献名	湧水が緩衝材の施工品質に及ぼす影響とその対策
3.執筆者	石井健嗣、小林一三、笹倉剛、朝野英一、鈴木圭、竹内伸光
4.設計・施工への反映すべき知見	<p><b>【施工】</b></p> <p>湧水環境を想定した実規模の施工エリアに対し、ベントナイト吹付け工法を用いた施工試験を実施し、以下を確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ベントナイト吹付け工法は、湧水環境下においても緩衝材の構築が可能。ただし、湧水を完全に止めることは困難であった。</li> <li>・パイピング・エロージョン現象は、仮設プラグなどによって体積拘束した緩衝材を効率良く膨潤させることによって抑制できる可能性がある。</li> </ul>
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材の施工方法：吹付け施工</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・吹付け材料には、Na 型ベントナイト（クミネ工業産クニゲル V1）に珪砂（三河珪砂V3 号とアルバニー珪砂5 号を質量割合1:1 で混合）を乾燥質量割合7:3 で混合した珪砂混じりベントナイトを使用</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	土木学会第 69 回年次学術講演会(平成 26 年 9 月) CS9-026 p51-52
9.その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材のパイピング・エロージョン対策として人工給水を実施する場合、給水箇所はなるべく分散させて膨潤領域を広範囲に亘るようにした方が、抑制効果の高いことがわかった</li> </ul>

緩衝材機能に係る文献調査 (14)

1.番号	No.110
2.文献名	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
3.執筆者	小林一三、鈴木圭、朝野英一、江藤次郎、竹内伸光
4.設計・施工への反映すべき知見	<p>【設計】</p> <p>工学的対策や施設設計に資する情報として、緩衝材のパイピングとエロージョン現象に関する実験的検討を実施し、地下水流量0.1ℓ/分の条件のもとで緩衝材 (KunogelV1、Kunipia F) のエロージョン量と地下水総流量の関係を提示。</p>
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：パイピング・エロージョン</li> <li>・緩衝材の施工方法：(供試体として) ブロック、ペレット、ブロック・ペレットの混合</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<p>ベントナイトとしてKunigel V1及びKunipia Fを使用。供試体として、以下を作製</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ベントナイト100%の大小ペレット (φ0.11m*H0.05m)</li> <li>・ベントナイト70%、ケイ砂30%のブロック (φ0.56m*H0.6m、φ0.05m*H1.0m)</li> <li>・モンモリロナイト100%のブロック (φ0.05m*H1.0m)</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	日本原子力学会2014年秋の大会 F11 p194
9.その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・エロージョン質量と総流量は比例関係にあるとみなせる (比例係数は通水液の種類ごとに異なる)</li> <li>・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にある</li> <li>・通水液のイオン強度が高い方がエロージョンし易い傾向にある</li> </ul>

緩衝材機能に係る文献調査 (15)

1.番号	No.111
2.文献名	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
3.執筆者	鈴木圭、竹内伸光、朝野英一、小林一三
4.設計・施工への反映すべき知見	<p>【設計】</p> <p>パイピング・エロージョン現象が緩衝材の長期性能に及ぼす影響を小さくするため、処分孔に許容される地下水流量とエロージョン量に関する定式化を行い、対策として以下を提示した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分坑道の早期閉鎖（閉鎖するまでの時間を短くする）</li> <li>・処分孔への地下水流入量の低減（止水工法や地下水低下工法などで流量を小さくする）</li> <li>・緩衝材の高乾燥密度化（処分孔当たりの緩衝材の乾燥質量を大きくする）</li> </ul>
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材に生じる挙動に関する事象：パイピング・エロージョン現象
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	—
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	日本原子力学会2014年秋の大会 F12 p195
9.その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・処分孔に対して許容される地下水流量を緩衝材のエロージョン量に対応して基準を設けるべく検討されている。</li> <li>・エロージョン現象が起こる時間を短くするためには、緩衝材の定置後、坑道の埋め戻しを行い、プラグで坑道を閉鎖するまでの時間を早める必要がある。</li> <li>・局所的に水位を回復させることが難しい場合には、人工的な注水なども併用する必要がある。</li> <li>・処分坑道の流量を小さくする対策としては、サイト選定の基準を厳しくすること、プレ・ポストグラウトの適用などが考えられる。</li> </ul>

緩衝材機能に係る文献調査 (16)

1.番号	No.118
2.文献名	ベントナイト吹付けによる緩衝材構築工法 (SHOTCLAY工法) の施工管理方法に関する検討
3.執筆者	石井健嗣、小林一三、笹倉剛、福田勝美、武地真一、神津圭輔
4.設計・施工への反映すべき知見	<p><b>【施工】</b></p> <p>ベントナイト吹付け工法において、吹付け材料の含水比と材料供給量を変化させた吹付け実験を行い、これらのパラメータと吹付けた緩衝材の乾燥密度との関係を取得し、吹付け材料の含水比が低下した際 (リバンウンド材の再利用) においても、緩衝材の品質を確保可能な施工管理方法を提示した。</p>
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材の施工方法：ロボットによる吹付け施工法</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・含水比を <math>w = 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23\%</math> に調整した吹付け材料 (クミネ工業産クニゲルGV、粒径 5mm以下) を使用</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	土木学会第 68 回年次学術講演会(平成 25 年 9 月) CS11-020 p39-40
9.その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実施工時においては、混合材料の含水比の速報値と緩衝材の要求性能 (目標乾燥密度) を比較し、今回作成した施工管理チャートから材料供給量を設定できる</li> </ul>

緩衝材機能に係る文献調査 (17)

1.番号	No.119
2.文献名	吹付けによる側部緩衝材施工の高度化
3.執筆者	小林一三、石井健嗣、笹倉剛、福田勝美、武地真一、寺田賢二、秋山吉弘、矢田勤
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】 ベントナイト系人工バリアのうち側部緩衝材を対象に、ロボットによる吹付け施工技術の高度化を図り、施工確認試験により施工品質の向上や施工の効率化が達成されたことを確認できた。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材の施工方法：吹付け工法（湿式吹付け技術）
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	・初期性能としての透水係数： $5 \times 10^{-13} \text{m/s}$ 以下を想定し、これに対応する施工管理指標として乾燥密度 $1.6 \pm 0.1 \text{Mg/m}^3$ 、含水比 $21 \pm 2\%$ を設定した。 ・試験には山形県月布産の粒状材料（クニゲル GX、最大粒径 $5 \text{mm}$ ）を使用。 ・試験の結果、目標とする緩衝材の密度を達成した（ $1.6 \pm 0.03 \text{Mg/m}^3$ 程度の範囲）
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	土木学会第 68 回年次学術講演会(平成 25 年 9 月) CS11-022 p43-44
9.その他	・閉塞対策、およびノズルワークの改良を行ったことにより、 $8 \text{m}^3$ 程度の施工において閉塞は一度も発生せず、施工速度は 20～30% 改善し、リバウンド回収に掛かる時間も大幅に短縮出来た。 ・側部緩衝材の施工方法として、吹付け工法は非常に低透水な緩衝材を構築する上で有効であり、実処分における施工に適用可能な工法である

緩衝材機能に係る文献調査 (18)

1.番号	No.120
2.文献名	緩衝材の再冠水挙動評価 (6) 比抵抗計測による再冠水時の緩衝材の飽和度分布の推定
3.執筆者	小林一三、鈴木圭、矢萩良二、朝野英一
4.設計・施工への反映すべき知見	<p>【施工】</p> <p>緩衝材の再冠水時における地下水浸潤挙動について、乾燥密度ごと (1.2Mg/m<sup>3</sup>、1.6 Mg/m<sup>3</sup>、1.8 Mg/m<sup>3</sup>、2.0 Mg/m<sup>3</sup>) の緩衝材の飽和度と比抵抗値の関係を実験により取得し、二次元浸潤土槽試験にこれを適用して整理し、比抵抗分布から飽和度分布が推定できることを示した。</p>
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<p>・緩衝材の特性評価方法：緩衝材の比抵抗値 <math>R</math> と飽和度 <math>s_r</math> の関係を</p> $R = \left\{ (\rho_d / \rho_w) / e^{0.01} \right\} \times (R_w / S_r^{2.3})$ <p>とした</p>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<p>土槽試験で使用した材料は、ケイ砂30wt%混合Na型ベントナイトであり、</p> <p>1辺50mmの立方体ブロックを縦横奥行方向に千鳥格子に配置して作製した。初期乾燥密度は1.556Mg/m<sup>3</sup>。</p>
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	日本原子力学会2013年秋の大会 O57 p724
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (19)

1.番号	No.121
2.文献名	吹付けによる緩衝材構築方法の高度化検討
3.執筆者	石井健嗣、小林一三、笹倉剛、福田勝美、武地真一
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】 使用材料の含水比と材料供給量を変化させた吹付け実験を行い、施工管理に活用可能なチャートを作成した。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材の施工方法：ロボットによる狭隘な場所に施工する吹付工法（湿式吹付け技術）
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	・含水比を $w = 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23\%$ に調整した吹付け材料を使用。 ・実験結果を整理し、施工管理値の目安である $1.6 \pm 0.1 \text{Mg/ m}^3$ 、および緩衝材全体の平均乾燥密度が $1.6 \text{Mg/ m}^3$ 以上を満足する施工管理チャート（含水比 $w[\%]$ と材料供給量 $[\text{kg}/10\text{sec}]$ の関係）を作成。
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	日本原子力学会2013年春の年会 A18 p18
9.その他	・リバウンド材の回収・再利用における吹付け材料の含水比低下時にも、施工管理チャートに従って材料供給量を調整することで、所定の乾燥密度を満足できることを確認した。



緩衝材機能に係る文献調査 (20)

1.番号	No.122
2.文献名	埋め戻しのための貧配合ベントナイトの吹付け施工に関する検討
3.執筆者	小林一三、笹倉剛、石井健嗣、福田勝美、柏崎博光、竹内信
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】 埋戻し材の施工への吹付け工法の適用性を確認するために貧配合ベントナイトの吹付けを行い、施工した埋め戻し材の力学・水理性能が問題ないことを室内試験により確認した。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材の施工方法：吹付け施工
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	・使用材料は、クニゲルV1とケイ砂の混合土
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	日本原子力学会2013年春の年会 A17 p17
9.その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・L1 施設における上部埋戻しエリアのうち、施工難度が高い狭隘エリアを模擬した三角型枠を用いて吹付け試験を行い、隅角部の充填性能を確認した。</li> <li>・締固めエネルギー5Ec での最適含水比より湿潤側で締固め度 90%以上を達成できた。</li> </ul>

緩衝材機能に係る文献調査 (21)

1.番号	No.128
2.文献名	緩衝材の再冠水挙動評価 (4) 緩衝材の施工方法に起因した隙間や大間隙が浸潤状況に及ぼす影響
3.執筆者	小林一三、鈴木圭、矢萩良二、朝野英一
4.設計・施工への反映すべき知見	<p>【施工】</p> <p>室内土槽による2次元浸潤試験により、緩衝材の施工に起因する隙間や大間隙（ペレット充填工法の隙間）が地下水浸潤挙動に及ぼす影響について調べた結果、再冠水時の緩衝材の膨潤圧に起因する偏圧などの影響を低減するため、極力均質で密実な緩衝材を構築する必要があることがわかった。</p>
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：地下水浸潤状況</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：比抵抗値</li> <li>・緩衝材の施工方法：ブロック工法、ペレット充填工法</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ペレットの充填工法（ペレット：粒径10～20mm 程度、平均乾燥密度：1.872Mg/m<sup>3</sup>）とブロック定置工法を検討対象とした。</li> <li>・模擬緩衝材の初期乾燥密度は、ペレット充填が1.156Mg/m<sup>3</sup>、ブロック定置が1.556Mg/m<sup>3</sup></li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	日本原子力学会2012年秋の大会 B32 p32
9.その他	<p>緩衝材の比抵抗値の変化から、以下がわかった。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ペレット充填工法では、その間隙から浸潤初期に緩衝材全体に水が行き渡るが、その後、膨潤によって地下水の供給が滞り、ペレット間の大間隙を満たす水をペレットがその内部に吸水して空隙が再度発生する</li> <li>・ブロック定置工法では、浸潤初期にブロック間の大隙間が選択的に水みちとなり、その後ブロック内に水が浸潤する。</li> <li>・これらのことから、地下水が一次的に浸潤できる境界条件であっても、緩衝材内部への地下水浸潤はその密度分布や隙間の影響で、必ずしも一次的ではなく、そのため、膨潤圧の分布も必ずしも一次的ではない。</li> </ul>

緩衝材機能に係る文献調査 (22)

1.番号	No.129
2.文献名	緩衝材の再冠水挙動評価 (3) 緩衝材のパイピング・エロージョン挙動および品質評価
3.執筆者	鈴木圭、矢萩良二、朝野英一、小林一三
4.設計・施工への反映すべき知見	<p>【施工】</p> <p>緩衝材定置後の再冠水期間に、地下水の浸入にともなって発生が懸念されるパイピング・エロージョンの発生条件や、地下水流量低下にともなう緩衝材の自己修復機能の発現条件について、浸潤試験の結果から知見を得た。</p>
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：パイピング・エロージョン、地下水浸潤</li> <li>・緩衝材の施工方法：ブロック工法、ペレット充填工法</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ペレット供試体は大小粒径混合ペレット（見かけの乾燥密度 <math>1.570\text{Mg/m}^3</math>）と大粒径ペレット（見かけの乾燥密度 <math>1.105\text{Mg/m}^3</math>）の2種類、およびブロック供試体は試験機のセルと供試体の隙間を <math>5\text{mm}</math> とし、膨潤後の隙間をシールした時に乾燥密度が約 <math>1.6\text{Mg/m}^3</math> となるように膨潤前乾燥密度を <math>1.96\text{Mg/m}^3</math> とした。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	日本原子力学会2012年秋の大会 B31 p31
9.その他	<p>不飽和の緩衝材に地下水が浸潤した場合の現象として、以下が確認された。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・流量 <math>0.1\ell/\text{分}</math> の場合、すべてのケースでパイピング・エロージョンが発生する。</li> <li>・初期の複数のパイピングが、時間経過とともに1つに収斂する。</li> <li>・大粒径ペレットの <math>1\text{m}</math> 長尺浸潤試験において、蒸留水を <math>0.001\ell/\text{分}</math> に低下させると、これまで <math>20\sim 25\text{kPa}</math> であった水圧が急激に上昇し、緩衝材の自己修復機能が発現する</li> <li>・ブロック供試体に海水相当 (<math>0.5\text{MNaCl}</math>) の溶液を通水すると、ベントナイトの凝集物とケイ砂が分離し、水みちにケイ砂が沈殿することが確認された。</li> <li>・<math>\text{NaCl}</math> 溶液を通水した場合、水みちに堆積したケイ砂は緩衝材の膨潤による水みちの修復（自己修復機能）を阻害する可能性がある。</li> </ul>

緩衝材機能に係る文献調査 (23)

1.番号	No.131
2.文献名	HYDRAULIC/MECHANICAL MODELING OF SMECTITIC MATERIALS FOR HMC ANALYTICAL EVALUATION OF THE LONG TERM PERFORMANCE OF TRU GEOLOGICAL REPOSITORY
3.執筆者	I. KOBAYASHI、 H. OWADA、 T. ISHII
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】 ベントナイト系人工バリアの止水性能評価モデルとして、H（水理）-M（力学）-C（化学）の連成解析モデル構築に向けた検討成果が示されている。ベントナイトの水理モデルとしては、力学及び化学との連成に適したKozeny-Carman則を適用し、この式で用いるベントナイトの比表面積をX線回析（XRD試験）により取得している。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材の特性評価方法：Kozeny-Carman 則を適用した透水係数と比表面積、間隙率
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	X線回析（XRD）試験においては、次の5種類の材料を使用； Na モンモリロナイト、Ca モンモリロナイト、Na ベントナイト（クニゲルV1）、Ca ベントナイト（Ca 型化クニゲルV1）、人工調整した Na ベントナイト
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	ICEM2011 Sept. 25-29, 2011, Reims, FRANCE ICEM2011-59090 p1-10
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (24)

1.番号	No.132
2.文献名	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
3.執筆者	小林一三、竹内信、藤澤惣、笹倉剛、鈴木圭、朝野英一
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】 様々なベントナイト系材料を用いた吹付け工法 (MX80、Milos Ca-benntonite、Friedlandclay、Kunigel V1) による緩衝材構築試験を行い、吹き付けられた緩衝材の密度を計測し、材料の違いによる影響を調べた。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	緩衝材の特性評価方法：乾燥密度、モンモリロナイト含有率 緩衝材の施工方法：湿式吹付け工法 (SHOTCLAY 工法)
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	吹付け材料 (層間陽イオン、モリロナイト含有率) : <ul style="list-style-type: none"> <li>・MX80 (Na、71.4%)</li> <li>・Milos Ca-benntonite (Ca、67.1%)</li> <li>・Friedlandclay (Na、27.1%)</li> <li>・Kunigel V1 (Na、61.9%)</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	日本原子力学会2011年秋の大会 B32 p87
9.その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul>

緩衝材機能に係る文献調査 (25)

1.番号	No.133
2.文献名	長尺供試体を用いたベントナイト系人工バリア材料の一次元浸潤速度の評価
3.執筆者	竹内 信、小林一三、笹倉剛、朝野英一、鈴木圭
4.設計・施工への反映すべき知見	<p>【設計】</p> <p>再冠水時に人工バリアに発生する各種現象の開始時期を推定する上で、地下水の浸潤速度を把握することは極めて重要であることから、比抵抗を計測することで浸潤速度を連続的に取得可能な試験装置を開発し、高さ1mの長尺供試体を用いて一次元状態が成り立つ境界条件での浸潤フロントの移動速度を取得した。</p>
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：緩衝材の浸潤速度</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・クニゲルV1に愛知県産のケイ砂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</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	土木学会第66回年次学術講演会(平成23年9月) CS3-020 p39-40
9.その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・比抵抗が初期値から 5%低下した時点で浸潤フロントが到達したと見做した場合の、浸潤フロントの底面からの位置d(mm)と経過時間t(day)の関係及び近似関数を示した。</li> <li>・1000mmの供試体の上端面まで浸潤フロントが進展するのに要する時間を算出すると、<math>t=1828</math>日となり、約5年に相当する。</li> </ul>

緩衝材機能に係る文献調査 (26)

1.番号	No.136
2.文献名	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
3.執筆者	小林一三、戸井田 克、朝野英一、須山泰宏、中島均
4.設計・施工への反映 すべき知見	【設計・施工】 密度の異なるベントナイト材料 (高密度、低密度) の直列膨潤圧試験による均質化過程の定量評価を行った結果、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が止まることが示唆され、施工による密度差が再冠水後にも残留する可能性があることが示された。
5.考慮すべき項目に 関する記載内容	・緩衝材に生じる挙動に関する事象： 試験初期の低密度供試体、高密度供試体はどちらも正規圧密線上にある。高密度供試体は膨潤して密度を下げながら $e\text{-log}P$ 関係の膨潤線をたどって降下し、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たどって上昇する。この時、両者の試験後の乾燥密度に対応する応力状態 (横軸) はほぼ同じ値であり、釣合っていること (応力が釣り合って膨潤変形が止まったこと) が示唆される。
6.緩衝材の仕様に関 する整理の視点	高密度側の乾燥密度は約 $2.0\text{Mg/m}^3$ 、低密度側の乾燥密度は約 $1.2\text{Mg/m}^3$ 、両者の平均乾燥密度は $1.6\text{Mg/m}^3$ 。試験に使用した材料はクニゲルV1 にケイ砂を30wt%加えたベントナイト混合土
7.緩衝材の整理の基 軸	—
8.出典	土木学会第 65 回年次学術講演会(平成 22 年 9 月) CS7-014 p27-28
9.その他	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、との解釈が可能。



緩衝材機能に係る文献調査 (27)

1.番号	No.137
2.文献名	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) 全体試験計画及びベントナイトの膨潤圧による均質化評価
3.執筆者	須山泰宏、朝野英一、中島均、小林一三、戸井田 克
4.設計・施工への反映 すべき知見	【設計・施工】 密度分布の異なる供試体を用いた膨潤圧試験を実施し、力学的観点からベントナイトの膨潤挙動における均質化に関する知見を整理した。
5.考慮すべき項目に 関する記載内容	・緩衝材に生じる挙動に関する事象： 膨潤圧試験を開始後約 70 日程度経過後、マスの乾燥密度が同じでも均質な供試体と不均質な供試体とでは膨潤圧が異なることがわかった。また、膨潤圧試験終了後の乾燥密度を測定した結果、均質化する傾向は見られたものの残留密度差が明らかに残っていることがわかった。
6.緩衝材の仕様に関 する整理の視点	・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
7.緩衝材の整理の基 軸	—
8.出典	土木学会第 65 回年次学術講演会(平成 22 年 9 月) CS7-013 p25-26
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (28)

1.番号	No.138
2.文献名	吹付け工法による側部緩衝材の施工確認試験例 —地下空洞型処分施設性能確証試験—
3.執筆者	藤澤惣、小林一三、戸井田克、寺田賢二、秋山吉弘、中島貴弘
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】 吹付け工法による実規模の施工確認試験を実施し、吹付け工法の地下環境下における人工バリアの構築技術としての適用性と品質を確認。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材の施工方法：側部緩衝材の吹付け工法（凍結混合方式による含水比調整材料を使用することで、材料のロスを減らし、より効率的に施工することが可能であることを確認）
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・使用材料は、最大粒径 5mmのクニゲルGX を用い、材料の含水比調整方法として、凍結混合方式および水添加混合方式の2種類の方法を採用。</li> <li>・使用機器は、最大圧力 0.69MPa, 風量 21.9m<sup>3</sup>/min のコンプレッサーとローター式吹付け機, 湿潤材料の定量供給機</li> <li>・リバウンド材料を吹付けながら再利用することによって、リバウンド率を13%まで低減することができた。</li> <li>・吹付け工法により側部緩衝材を構築し、施工管理目標値である乾燥密度 1.6±0.1Mg/m<sup>3</sup> を十分満足し、かつ均質な緩衝材を施工することが可能</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	土木学会第 65 回年次学術講演会(平成 22 年 9 月) CS7-007 p13-14
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (29)

1.番号	No.139
2.文献名	高レベル放射性廃棄物処分における人工バリアの施工品質管理技術に関する検討
3.執筆者	中畠誠門、小林一三、戸井田克、朝野英一、中島均
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】 緩衝材の施工品質管理のための計測技術について、乾燥密度および含水比の計測技術を文献調査などで抽出し、小型・中型供試体を測定することによって、基本的な適用性を評価した。検討の結果、同じ計測方法であっても施工方法が異なれば計測結果の精度が異なることが示された。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材の施工方法：ブロック定置工法、ペレット充填工法、現場締め工法、吹付け工法
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	—
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	土木学会第64回年次学術講演会(平成21年9月) CS5-038 p209-210
9.その他	施工方法ごとに品質管理手法を技術メニューとして整備していく必要性がある。

緩衝材機能に係る文献調査 (30)

1.番号	No.142
2.文献名	地下空洞型処分施設性能確証試験における吹付け工法による緩衝材施工の検討
3.執筆者	小林一三, 戸井田 克, 中寫誠門, 田中俊行, 福田勝美 野中克美, 神津圭輔, 寺田賢二, 松村勝秀, 大沼和弘
4.設計・施工への反映すべき知見	<b>【施工】</b> 現場締固めが難しいと考えられる箇所の施工法として開発した吹付けによる高密度緩衝材の構築(Shotclay)工法を底部緩衝材で施工した。吹付け工法による乾燥密度は目標範囲内となり, 均質であることが分かった。また, 施工手順や施工管理方法の妥当性も確認できた。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材の施工方法: 吹付け工法 (狭隘な場所に施工する場合の緩衝材の施工方法のオプションとしての位置づけ)
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	・凸部やブロックサンプリング部の乾燥密度はいずれも 1.54~1.58 Mg/m <sup>3</sup> という結果であった。 ・ブロックサンプリング部 (吹付け型枠隅角部付近) の密度差が 0.04Mg/m <sup>3</sup> 程度であった。
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	土木学会第63回年次学術講演会(平成20年9月) CS05-07 p181-182
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (31)

1.番号	No.143
2.文献名	地下空洞型処分施設性能確証試験における凍結混合方式による含水比調整方法の検討
3.執筆者	中畷誠門, 戸井田 克, 小林一三, 田中俊行, 福田勝美, 寺田賢二, 松村勝秀, 大沼和弘
4.設計・施工への反映すべき知見	<b>【施工】</b> 吹付け工法による施工試験において、凍結混合方式による含水比調整（あらかじめ-10℃以下の温度に冷却したベントナイト材料と微粒子状に粉碎した氷を-10℃以下の低温環境下で混合し、その後常温で解凍）を行い、高い調整精度と機器の定期的なメンテナンスの簡略化を達成できることが確認された。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材の施工方法：吹付け工法
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	・約8tの材料の含水比調整（クニゲル GV（クニゲル原鉱石を破碎したもののうち粒径 5mm 以下），設定含水比 21.0%）を簡易な設備で実施し，含水比の調整精度や調整した材料を使用 ・初期含水比 5.9～9.2%の材料を21±1.0%の範囲内に調整できており，ほぼ設定含水比どおりの材料が得られた。
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	土木学会第63回年次学術講演会(平成20年9月) CS05-06 p179-180
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (32)

1.番号	No.145
2.文献名	飽和過程におけるベントナイトの弾性波速度に関する実験的検討
3.執筆者	戸井田克、中畷誠門、小林一三、田中真弓
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】 密度をパラメータとした複数のベントナイト供試体を作製し、各条件における弾性波速度測定を行い、反射波観測の基礎実験を実施した。その結果、含有水分量の違いを弾性波でモニタリングできる可能性があることが確認できた。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材の特性評価方法：含有水分量と弾性波速度
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	・乾燥密度をパラメータとしたベントナイト供試体（直径 150mm、高さ 125mm）を作製し、弾性波速度を測定して密度と弾性波速度との関係を確認した。
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	日本原子力学会2008年春の年会 I3 p406
9.その他	・飽和度 100%の条件下では密度が大きいほど弾性波速度は大きく、含有水分量の違いを弾性波でモニタリングできる可能性があることを確認した。

緩衝材機能に係る文献調査 (33)

1.番号	No.146
2.文献名	高レベル放射性廃棄物地層処分の遠隔ハドリリング・定置技術の開発 (6) 緩衝材の施工品質管理方法の検討 (その1) 緩衝材の密度計測について
3.執筆者	戸栗智仁、朝野英一、小林一三、戸井田克、中嶋誠門
4.設計・施工への反映すべき知見	<b>【施工】</b> 緩衝材の密度や含水比について、計測方法の誤差、計測時間などの特性を室内実験によって取得し、緩衝材の施工品質管理方法としての適用性を評価した。実験した各計測手法は、乾燥密度や含水比の計測が可能であると評価された。また、試料採取が必要な計測手法は、計測誤差は小さいが計測時間が長くなる等の特性を確認した。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材の特性評価方法：乾燥密度、含水比の測定手法の評価
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	・乾燥密度 (1.4, 1.6, 1.8(Mg/m <sup>3</sup> ))の3水準) と含水比 (ベントナイト含水比18, 20, 22(%))の3水準) をパラメータとし、供試体 (φ600mm×H500mm およびφ50mm×H30mmの2種類) を作製 ・実験した各計測手法 (ノギス法、パラフィン法、シリコンオイル比重法、音響式比重法、地盤硬度測定による方法、RI法 (透過型)、RI法 (散乱型)、炉乾燥法、電子レンジ法、土壌水分測定による方法、近赤外線水分計による方法、重錘落下法) は、乾燥密度や含水比の計測が可能であると評価された。 ・上記のうち試料採取が必要な計測手法 (ノギス法、パラフィン法、シリコンオイル比重法、音響式比重法、炉乾燥法、電子レンジ法) は、計測誤差は小さいが計測時間が長くなる等の特性を確認した。
7.緩衝材の整理の基軸	緩衝材の要件である透水性能や力学性能と相関を持つ「密度」と「含水比」に着目
8.出典	日本原子力学会2008年春の年会 I55 p458
9.その他	—



緩衝材機能に係る文献調査 (34)

1.番号	No.147
2.文献名	高レベル放射性廃棄物地層処分の遠隔ハドリグ・定置技術の開発 (7) 緩衝材の施工品質管理方法の検討 (その 2) 熱伝導率による緩衝材の 密度管理方法
3.執筆者	小林一三、戸井田克、中畠誠門、戸栗智仁、朝野英一
4.設計・施工への反映 すべき知見	<b>【施工】</b> 緩衝材の密度管理手法として、熱伝導率計測が遠隔操作による施工時 の密度および含水比の管理方法として有望な技術のひとつであること が示された。
5.考慮すべき項目に 関する記載内容	・緩衝材の特性評価方法：熱伝導率、含水比
6.緩衝材の仕様に関 する整理の視点	—
7.緩衝材の整理の基 軸	—
8.出典	日本原子力学会2008年春の年会 I56 p459
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (35)

1.番号	No.148
2.文献名	等含水比線と等飽和度曲線を用いた締固めベントナイトの圧縮・膨潤挙動の解釈
3.執筆者	小林一三、戸井田克、笹倉剛、太田秀樹
4.設計・施工への反映すべき知見	<p>【設計】</p> <p>締固めベントナイトの圧縮・膨潤挙動を<math>e</math>-<math>\ln \sigma_v</math>平面における等含水比線と等飽和度曲線を用いて地盤力学に基づく統一的な解釈を行った。具体的には、ベントナイトの室内力学試験結果を基に、ベントナイトの構成モデルの構築に資する実験結果を整理し、モデル構築のための概念を提示した。</p>
5.考慮すべき項目に関する記載内容	—
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ベントナイトの正規圧密線は、幾つかの含水比に調整した材料を一次元圧縮した際の飽和点を結ぶことで得られる。</li> <li>・動的締固めから得られる締固め曲線を<math>e</math>-<math>\log \sigma_v</math>平面にプロットすることが可能となった。</li> <li>・ベントナイトの土粒子密度とベントナイトの一次元圧縮による等含水比線を取得すれば、<math>e</math>-<math>\log \sigma_v</math>関係を求めることができる。</li> <li>・ベントナイトは吸水により応力履歴を忘失する。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	土木学会論文集C Vol.63No.4, 1065-1078, 2007.12
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (36)

1.番号	No.150
2.文献名	Development of Construction Methods of the bentonite engineered barrier by the high-density shotclay system
3.執筆者	I. Kobayashi、M. TOIDA、Ma.NAKAJIMA、To. TANAKA、Ke. TERADA
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】 高密度ベントナイトの吹付け工法により、有効乾燥密度1.6 Mg/m <sup>3</sup> の施工品質が達成できることを確認するとともに、密度の分布が現位置締固め工法よりも均質に施工できること、また狭隘な個所への施工にも適していることを確認した。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材の施工方法：高密度吹付け工法（The high-density shotclay system）
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	・平均乾燥密度 1.6 Mg/m <sup>3</sup> 、透水係数1E-10~12 m/s 以下
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	Preprints of contributions to the workshop on Long-term performance of smectic clays embedding canisters with highly radioactive wasters, 2007.11 pp52-59
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (37)

1.番号	No.151
2.文献名	圧縮成型ベントナイトの透水係数に及ぼすNaNO <sub>3</sub> 濃度の影響
3.執筆者	三原弘、小林一三
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】 圧縮成型ベントナイトの乾燥密度を1.8Mg/m <sup>3</sup> として、通液の硝酸ナトリウムの濃度を変化させて測定し、硝酸ナトリウムが緩衝材の透水係数に及ぼす影響を実験的に調査し知見を得た。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材の設計要件：透水係数に対する通水液の濃度の影響
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・通液の硝酸ナトリウムの濃度が高くなるにともない圧縮成型ベントナイトの透水係数が大きくなった。この透水係数の増加は、試料における水みちの形成によるものではない。</li> <li>・透水係数の増加は、硝酸ナトリウム濃度が0～2mol/Lまでは著しいが、2mol/Lを超えてもほとんど変化しない。</li> <li>・ベントナイトの乾燥密度を1.8Mg/m<sup>3</sup>とすると、通液が高塩濃度においても、透水係数の性能目標値10<sup>-11</sup>m/sを下回った。</li> <li>・乾燥密度を大きくすると、通液の塩濃度の影響を受けにくくなるとともに、通液の塩濃度の影響を受けにくくなる。</li> <li>・硝酸ナトリウム水溶液の濃度がベントナイトの透水係数に及ぼす影響のうち、粘性率の影響は小さいことが確認された。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	JAEA-Research 2007-020 p1-45
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (38)

1.番号	No.152
2.文献名	MODELLING FOR THE LONG-TERM MECHANICAL AND HYDRAULIC BEHAVIOR OF BENTONITE-BASED MATERIALS CONSIDERING CHEMICAL TRANSITIONS
3.執筆者	F. Sahara、T. Murakami、I. Kobayashi、M. Mihara、T. Ohi
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】 TRU廃棄物処分における緩衝材を含む人工バリア材料の長期力学変遷解析システム「MACBECE」について、ベントナイト緩衝材の力学変遷モデルについて示されており、力学挙動に影響を及ぼすパラメータ（インプットデータ）として「化学変遷指標」が挙げられている。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：浸透膨潤を考慮した弾塑性変形挙動、及び化学状態変遷によるパラメータの変化を考慮</li> <li>・緩衝材の設計要件：透水性係数（長期変遷）</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	—
7.緩衝材の整理の基軸	<p>緩衝材の長期変遷挙動に影響を与える化学事象（イオン交換、スメクタイトの溶解、二次鉱物の生成、間隙水組成の変化）に対応する化学変遷指標として以下が挙げられている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・交換性ナトリウム率</li> <li>・スメクタイト密度</li> <li>・スメクタイト部分間隙比</li> <li>・間隙率</li> <li>・間隙水中の当量イオン濃度</li> </ul>
8.出典	INTERNATIONAL MEETING, SEPTEMBER 17...>...18, 2007, LILLE, FRANCE CLAYS IN NATURAL & ENGINEERED BARRIERS FOR RADIOACTIVE WASTE CONFINEMENT Page 555-556
9.その他	<p>参考：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 核燃料サイクル開発機構 東海事業所:ベントナイト系材料の飽和透水性係数の変遷評価式(研究報告)、JNC TN8400 2005-029、2005年8月</li> <li>2) 鹿島建設株式会社、株式会社クインテッサジャパン:ニアフィールド水理場の長期的変遷評価システム構築に関する研究Ⅳ(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)、JNC TJ8400 2005-012、2005年2月</li> </ol>



緩衝材機能に係る文献調査 (39)

1.番号	No.154
2.文献名	覆土現場施工試験 (その4) -施工品質管理のための迅速な止水性能評価方法-
3.執筆者	小林一三、戸井田克、河津幸治、藤原斉郁、中島均 大西利満、小椋司、鳥山進、鳴海恵一郎、工藤直洋
4.設計・施工への反映すべき知見	<b>【施工】</b> 難透水性層の透水係数を迅速に測定する方法について検討し、供試体の分割数を変化させることにより透水試験に要する時間が精度を落とすことなく短縮できることが示された。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・緩衝材の特性評価方法：透水係数の測定（難透水性層の透水係数を迅速に測定する方法として、並列飽和一直列フローポンプ透水試験による透水係数測定を開発）
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	—
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	土木学会第62回年次学術講演会(平成19年9月) CS5-031 p221-222
9.その他	—



緩衝材機能に係る文献調査 (40)

1.番号	No.155
2.文献名	高密度ベントナイト吹付工法の開発 (その1) -高品質なベントナイト構築のための材料供給方法の検討-
3.執筆者	中畠誠門、田中俊行、小林一三、佐藤竜郎、野中克己、矢部順一、神津圭輔
4.設計・施工への反映すべき知見	<p><b>【施工】</b></p> <p>より高品質なベントナイト系人工バリアの構築を目的として、吹付け工法において、密度分布を均一にするための高精度な材料供給制御方法に関する検討を行った。定量的かつ連続的に材料を供給できる装置を導入した結果、ベントナイト吹付けに十分に適用可能であることを確認した。</p>
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材の施工方法：吹付け工法（空気圧縮機から供給される空気の流れによって個々のベントナイト粒子に速度エネルギーを与え、これを吹付け面への衝突エネルギーとすることで密度を得る工法）</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ベントナイト原稿石100%（Gmax=5mm，クニミネ製）の含水比を加水混合または凍結混合2）で調整したものを材料供給速度試験に使用した。</li> <li>・いずれの含水比のケースでも，供給開始後5秒ほどで供給速度が安定に達し，材料が残り10kg程度になるまで速度をほぼ一定に保ったまま供給できていることが確認彰認できた</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	土木学会第62回年次学術講演会(平成19年9月) CS5-009 p177-178
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (41)

1.番号	No.156
2.文献名	高密度ベントナイト吹付工法の開発 (その2) -密度のばらつきと施工方法の検討-
3.執筆者	戸井田克、田中俊行、中畠誠門、小林一三、福田勝美 佐藤竜郎、野中克美、矢部順一、神津圭輔
4.設計・施工への反映 すべき知見	<b>【施工】</b> 吹付け工法において、最適な吹付け方向を選定するため、鉛直下向きおよび水平向きに吹付けた場合の乾燥密度のばらつきを調べ、その施工性を検討した。鉛直下向きの吹付けはリバウンドの集積が困難である一方、水平に吹付けることで、①現場締固め施工に必要な妻側型枠が要らず、大規模な揚重設備も不要であること、②必要な延長分の施工が可能であり建設工程が容易であること、等の長所が挙げられた。
5.考慮すべき項目に 関する記載内容	・緩衝材の施工方法：吹付け工法（鉛直下向き）、水平方向（ロボット）、水平方向（人力）、超音速ノズル（最狭径 25mm）でノズルから吹付け面まで約 1000mm の距離を保持
6.緩衝材の仕様に関 する整理の視点	・ベントナイト原鉱石100%（クニミネ製，Gmax=5mm）を加水混合で含水比調整したものを使用 ・吹付け施工で得られた密度は、現場締固め施工のような密度差が生じず、ばらつきが小さく均一であった。
7.緩衝材の整理の基 軸	—
8.出典	土木学会第62回年次学術講演会(平成19年9月) CS5-010 p179-180
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査（42）

1.番号	No.158
2.文献名	難透水性層の施工品質管理のための迅速な透水試験方法
3.執筆者	小林 一三, 戸井田 克, 河津 幸治, 小椋 司, 鳥山 進, 鳴海 恵一郎, 工藤 直洋
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】試験時間が長く全体工程のボトルネックとなりかねない従来の定圧式透水係数法に比べ、1/3～1/4の時間で透水係数を測定する方法を開発した。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：－</li> <li>・緩衝材の設計要件：低透水性</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：透水係数</li> <li>・緩衝材の施工方法：－</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料：ベントナイト混合率30%のベントナイト混合土</li> <li>・製作施工性：通常の加圧式透水試験では2ヶ月かかる透水試験が、 φ100mm×H100mmの供試体では閉鎖系フローポンプ式透水試験法の採用により15日になり、さらに透水試験期間を並列飽和一直列透水試験では9日まで短縮できた。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	－
8.出典	日本原子力学会2007年春の年会 I46 p426
9.その他	－

緩衝材機能に係る文献調査 (43)

1.番号	No.159
2.文献名	フローポンプ透水試験のバリア材料への適用 (2)
3.執筆者	瀬尾 昭治, 小林 一三, 戸井田 克, 横田 泰宏, 佐々木 泰
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】1000mmの供試体を使用し、水圧・流量・温度が高精度で制御できる透水試験装置を開発した
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：－</li> <li>・緩衝材の設計要件：地下水の浸潤状況</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：透水係数</li> <li>・緩衝材の施工方法：－</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料：最長1,000mmまでの供試体</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	本装置を用いることで流速，透水係数，動水勾配が全て局所的な同一の場所における値となるため，ダルシー則の空間的な整合性が取れ，さらにこれまで取得できなかった局所的動水勾配を実験から評価できる。
8.出典	日本原子力学会2007年春の年会 I13 p393
9.その他	－

緩衝材機能に係る文献調査（44）

1.番号	No.160
2.文献名	吹付け工法によるHLW・TRU地層処分施設の緩衝材の構築
3.執筆者	小林 一三, 田中 俊行, 中寫 誠門, 上本 勝広
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】吹付け工法によって、高乾燥密度で密度のばらつきが小さい均一な緩衝材の構築が可能になった。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：再冠水時における不均質な膨潤挙動</li> <li>・緩衝材の設計要件：製作施工性</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：乾燥密度</li> <li>・緩衝材の施工方法：吹付け工法</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料：クニゲルV1（ケイ砂混合率：0、30、50、70%）</li> <li>・製作施工性：吹付け工法によって高密度でばらつきの小さい高品質な緩衝材を施工可能となり、施工時における周辺部への力学的影響を低減することが可能となる。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高密度でばらつきの小さい緩衝材を構築可能であるため、再冠水時における不均質な膨潤圧発生リスク抑制が期待できる</li> </ul>
8.出典	日本原子力学会2007年春の年会 I45 p425
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (45)

1.番号	No.163
2.文献名	飽和過程におけるベントナイトの膨潤挙動に関する実験検討 (その2)
3.執筆者	藤崎 勝利, 小林 一三, 中寫 誠門, 北本 幸義
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計・施工】再冠水時の原鉱ベントナイト (最大粒径 $D_{max}=4.75\text{mm}$ ) を使った土層試験における緩衝材の締固め曲線と膨潤圧の関係、乾燥密度と平衡膨潤圧の関係
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：不均一な膨潤挙動、地下水浸潤</li> <li>・緩衝材の設計要件：自己シール性、低透水性、自己修復性</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：最適含水比と平衡膨潤圧および乾燥密度の関係、膨潤圧</li> <li>・緩衝材の施工方法：－</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料：最大粒径4.75mmの原鉱ベントナイト</li> <li>・自己シール性、低透水性、自己修復性：不均一な膨潤状態を模擬した土層実験結果から、給水位置からの距離によっては、膨潤圧に平衡膨潤圧相当の差異が生じる。給水開始90日後においても膨潤圧は均等にならないが、含水比は飽和含水比を超過した。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	－
8.出典	土木学会第61回年次学術講演会 (平成18年9月) CS05-073 p351-352
9.その他	－

緩衝材機能に係る文献調査（46）

1.番号	No.164
2.文献名	凍結混合方法によるベントナイト系人工バリア材料の含水比調整法
3.執筆者	小林 一三, 戸井田 克, 田中 俊行, 中畠 誠門, 佐藤 竜郎
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】氷点下に冷却したベントナイトと微粒子に粉碎した氷を、低温環境下において粉体状態で混合することにより、簡便に含水比調整が可能であり、混合プラントを具体化できる。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：－</li> <li>・緩衝材の設計要件：含水比の均質な調整</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：含水比、粒度分布、膨潤圧</li> <li>・緩衝材の施工方法：凍結混合方式による含水比調整方法</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料：原鉱ベントナイト</li> <li>・製作施工性：凍結混合方式による含水比調整方法では、混合機械に高い攪拌性能を要求しないため、少量であれば人力混合、大量であればコンクリート用二軸パドルミキサの使用により同品質の含水比調整ベントナイトを作製可能である。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	従来法で問題となる、団粒化や単粒径化、攪拌機械へのへばり付き、処理量の増大などを解決可能である。
8.出典	土木学会第61回年次学術講演会（平成18年9月） CS05-070 p345-346
9.その他	－



緩衝材機能に係る文献調査 (47)

1.番号	No.165
2.文献名	吹付け工法による高密度ベントナイト施工試験—施工条件の検討—
3.執筆者	中畷 誠門, 小林 一三, 田中 俊行, 戸井田 克
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】狭隘部においてベントナイトを高密度に施工する方法として吹付け工法について検討し、目標とする乾燥密度、リバウンド率が得られる施工条件を明らかにした。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：－</li> <li>・緩衝材の設計要件：低透水性、製作施工性</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：乾燥密度、リバウンド率</li> <li>・緩衝材の施工方法：狭隘な部分での吹付け工法</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料：凍結混合方法で均一に含水比調整したベントナイト原鉱石単体（山形県産、最大粒径5mm、均等係数7.2、土粒子密度2.733Mg/m<sup>3</sup>）</li> <li>・製作施工性：ノズル径19mm、吹付け距離1000mm、含水比19.5%の施工条件で吹付けを行えば、目標平均乾燥密度1.6 Mg/m<sup>3</sup>以上と目標リバウンド率30%以下を達成できる。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	－
8.出典	土木学会第61回年次学術講演会（平成18年9月） CS05-055 p315-316
9.その他	－

緩衝材機能に係る文献調査 (48)

1.番号	No.166
2.文献名	吹付け工法によるベントナイト系人口バリアの施工試験
3.執筆者	中畷 誠門, 小林 一三, 田中 俊行, 戸井田 克
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】狭隘部においてベントナイトを高密度に施工する方法として、湿式吹付け工法について検討し、目標乾燥密度に吹付けを行うための施工条件を明らかにした。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：－</li> <li>・緩衝材の設計要件：製作施工性</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：含水比、乾燥密度</li> <li>・緩衝材の施工方法：湿式吹付け工法</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料：凍結混合方法で均一に含水比調整したベントナイト原鉱石単体（山形県産、最大粒径5mm、均等係数7.2、土粒子密度2.733Mg/m<sup>3</sup>）</li> <li>・製作施工性：吹付機のノズル径22mm以下で目標乾燥密度1.6Mg/m<sup>3</sup>以上を達成できた。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	バッチ式によるベントナイト吹付けでは、材料吐出量の制御が困難であり、材料がホース内に閉塞しやすいことが判明した。この問題は、材料吐出量を制御できるロータリー式吹付け機を使用することで解決可能である。また、空気圧縮機の能力に対する材料供給量が吹付け試料の乾燥密度に大きな影響を与えることが分かっているほか、1つの孔に入る材料の量を、回転数を変えて調整することで、材料供給の安定化と吹付け試料の均質化を実現できると考えられことから、材料供給量と回転数の2つのパラメータは施工管理上重要である。
8.出典	第41回地盤工学研究発表会2006年7月 1229 p2457-2458
9.その他	－

緩衝材機能に係る文献調査 (49)

1.番号	No.167
2.文献名	吹付け工法による高密度ベントナイト施工試験
3.執筆者	田中 俊行, 小林 一三, 中畷 誠門, 戸井田 克
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】吹付け工法による緩衝材の施工を対象として、透水係数 $10^{-13}$ m/secオーダーが得られる乾燥密度 $1.6\text{Mg/m}^3$ 以上を達成するための空気圧縮機の圧力や吐出流量、最適なノズル形状を明らかにした。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：－</li> <li>・緩衝材の設計要件：製作施工性</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：乾燥密度</li> <li>・緩衝材の施工方法：吹付け工法</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料：凍結混合方法で均一に含水比調整したベントナイト原鉱石単体（山形県産、最大粒径5mm、含水比18%）</li> <li>・製作施工性：超音速ノズル（最狭幅9mm）を用い、空気圧縮機の吐出圧力は0.6～0.8MPa、吐出流量は11.0～18.5m<sup>3</sup>/minの範囲で乾燥密度<math>1.6\text{Mg/m}^3</math>以上を達成できる。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	得られた平均乾燥密度は、 $1.60\sim 1.66\text{Mg/m}^3$ となり、吹付け工法で困難とされてきた乾燥密度 $1.6\text{Mg/m}^3$ 以上を達成できた。
8.出典	日本原子力学会2006年春の年会 B28 p28
9.その他	－

緩衝材機能に係る文献調査 (50)

1.番号	No.168
2.文献名	飽和過程におけるベントナイトの膨潤挙動に関する土層実験
3.執筆者	藤崎 勝利, 北本 幸義, 小林 一三, 中畷 誠門, 田中 俊行, 笹倉 剛
4.設計・施工への反映 すべき知見	【設計・施工】ベントナイトが完全飽和に至る前の部分飽和段階で膨潤圧が発生し、ベントナイト層内の膨潤状態に差異が生じた場合、隣接して設置されるセメント系構造体等に偏圧が作用する可能性がある。
5.考慮すべき項目に 関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：膨潤挙動、地下水浸潤</li> <li>・緩衝材の設計要件：自己シール性、低透水性、自己修復性</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：乾燥密度、飽和度、膨潤圧</li> <li>・緩衝材の施工方法：－</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関 する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料：原鉱ベントナイト（最大粒径4.75mm）</li> <li>・自己シール性、低透水性、自己修復性：膨潤圧は吸水開始直後から発生し、膨潤圧が平衡状態になった後も含水比が僅かに上昇する。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基 軸	最大膨潤圧 $\sigma_{smax}$ は乾燥密度 $\rho_d$ に依存し、乾燥密度 $\rho_d$ が同等であれば、最大膨潤圧 $\sigma_{smax}$ は飽和度変化量 $\Delta S_r$ の差異の原因となる締固め時の含水比には依存しない。
8.出典	土木学会第60回年次学術講演会（平成17年9月） 3-058 p115-116
9.その他	－

緩衝材機能に係る文献調査 (51)

1.番号	No.169
2.文献名	吹付け工法によるベントナイト系人工バリアの構築
3.執筆者	小林 一三, 笹倉 剛, 田中 俊行, 中畷 誠門, 戸井田 克, 上本 勝広
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】狭隘箇所ではベントナイト系人工バリアを施工する方法として湿式吹付け施工法が適用可能であることを示した。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：－</li> <li>・緩衝材の設計要件：製作施工性</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：スラリー液固比、含水比、付着率、乾燥密度</li> <li>・緩衝材の施工方法：吹付け工法</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料：液体、紛体ベントナイト、ベントナイト原鉱石を出来上がりの含水比が同等になるように、ベントナイトスラリーとベントナイト原鉱石を混合して作成した吹付け材料</li> <li>・製作施工性：吹付け試験の結果、乾燥密度が最大で1.75Mg/m<sup>3</sup>となり、湿式吹付け工法によるベントナイト系人工バリアの構築が可能である。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	－
8.出典	土木学会第60回年次学術講演会（平成17年9月） 3-064 p127-128
9.その他	<p>液体、紛体ベントナイト、ベントナイト原鉱石を出来上がりの含水比が同等になるように、ベントナイトスラリーとベントナイト原鉱石を混合して吹付け材料を作成した。このとき、液体として重曹水を使用することで以下の優位点がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・重曹水を用いて作成したベントナイトスラリーは、同一フロー値と比較すると、水を用いた場合よりスラリー濃度を5倍程度にすることができるため、出来上がりの乾燥密度を増加させることができる。</li> <li>・間隙水中の炭酸イオンCO<sub>3</sub><sup>2-</sup>がコンクリートから溶出するCa<sup>2+</sup>と結合し、表面に難溶性の炭酸カルシウムを生成して緻密化させる効果がある。</li> <li>・陽イオンがNa<sup>+</sup>であるため、Na型ベントナイトと陽イオン交換反応を生じることがない。</li> <li>・間隙水のイオン強度が地下水によって希釈されるまでは、ベントナイトの膨潤を抑制するため、建設・作業時の漏水、滴水などによる想定外の膨潤を防ぐ効果が期待できる。</li> </ul>



緩衝材機能に係る文献調査 (52)

1.番号	No.170
2.文献名	冷却ベントナイトと微粒子氷による含水比調整法
3.執筆者	小林 一三, 笹倉 剛, 田中 俊行, 中畷 誠門, 戸井田 克, 上本 勝広
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】冷却したベントナイトと微粒子に粉碎した氷を使用し, 低温環境下の粉体状態で混合する簡便な含水比調整を行う方法を検討
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：－</li> <li>・緩衝材の設計要件：製作施工性</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：含水比</li> <li>・緩衝材の施工方法：冷却混合方法</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料：原鉱ベントナイト（最大粒径20mm）</li> <li>・製作施工性：冷却混合方法による含水比調整が可能である。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	<p>冷却混合方法のメリットとして以下の5点ある。</p> <p>①原鉱ベントナイトの粒度分布がほとんど変化しない（団粒状にならない），②短時間で均一に混合できる，③同一締固めエネルギーで高密度になる，④簡単，かつ大量にバッチ式で混合できる，⑤気流で混合しながら圧送出来る。</p>
8.出典	土木学会第60回年次学術講演会（平成17年9月） 3-060 p119-120
9.その他	－



緩衝材機能に係る文献調査 (53)

1.番号	No.201
2.文献名	「(3) 処分場の設計と工学技術」緩衝材の設計要件
3.執筆者	窪田 茂
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】緩衝材の設計要件、方法、指標、基準がNUMOから示された。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<p>設計要件として、安全機能に係る要件として以下の6項目、実現性に関わる項目として1項目選定された。</p> <p>安全機能に係る要件</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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、緩衝材の密度を確認する。</li> <li>・微生物の影響の防止：緩衝材内で微生物活動が生じないことを確認する。</li> <li>・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決定する。</li> <li>・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。</li> </ul> <p>実現性に関わる要件</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・製作施工性：緩衝材ブロック製作可能な密度であることを確認する。</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<p>安全機能に関わる設計要件に対する指標、基準は以下の通り。</p> <p>安全機能に係る要件</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・低透水性：ペクレ数 0.1 以下</li> <li>・自己シール性：膨潤率/隙間堆積比 2 以上</li> <li>・コロイドろ過能：コロイド透過率 0</li> <li>・微生物の影響の防止：菌体数、増殖しない</li> <li>・物理的緩衝性：緩衝材圧密反力と地下静水圧の合計、オーバーパックの耐圧強度を下回り、急増しないこと。</li> <li>・自己修復性：有効粘土密度 1 以下</li> </ul> <p>実現性の設計要件に関する指標は以下の通り。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・製作施工性：有効粘土密度 1.8Mg/m<sup>3</sup> 以下</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基	—

軸	
8.出典	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（2016年9月21日、大阪）資料-4「(3) 処分場の設計と工学技術」P.4-18
9.その他	

緩衝材機能に係る文献調査 (54)

1.番号	No.202
2.文献名	「(3) 処分場の設計と工学技術」緩衝材の評価項目
3.執筆者	窪田 茂
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】緩衝材の設計要件、方法、指標、基準がNUMOから示された。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<p>緩衝材の評価項目として、以下の3項目が提示された。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・長期沈下挙動：長期の圧密現象により沈下が継続したとしても、緩衝材の使用成立範囲に収まることを確認する。</li> <li>・岩盤クリープ・オーバーパックスの腐食膨張による影響：オーバーパックスの腐食膨張や岩盤の変形による力学的な相互作用を考慮しても、長期にわたり物理的緩衝性を維持し、廃棄体を安定的に支持できることを、緩衝材使用に対して確認する。</li> <li>・地震時の力学的安定性：大規模な地震動に対しても、オーバーパックスや緩衝材が力学的な安定性を損なわないことを、人工バリア仕様に対して確認する。</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<p>それぞれの評価項目に対する指標、基準は以下の通り。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・長期沈下挙動：緩衝材厚さ、400mm以上</li> <li>・岩盤クリープ・オーバーパックスの腐食膨張による影響： <ul style="list-style-type: none"> <li>指標1 緩衝材圧密反力と地下水静水圧との合計、</li> <li>基準1 オーバーパックスの耐圧強度を下回ること。</li> <li>指標2 緩衝材の破壊接近度</li> <li>基準2 1未満、部分的な限界状態は許容</li> </ul> </li> <li>・地震時の力学的安定性： <ul style="list-style-type: none"> <li>指標1 緩衝材の破壊近接度、</li> <li>基準1 未満、部分的な限界状態は許容</li> <li>指標2 オーバーパックスのMises応力</li> <li>基準2 降伏強度以下</li> </ul> </li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	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 (2016年9月21日、大阪) 資料-4 「(3) 処分場の設計と工学技術」 P.4-19
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (55)

1.番号	No.203
2.文献名	「(3) 処分場の設計と工学技術」設計要件を満足する緩衝材の仕様範囲
3.執筆者	窪田 茂
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】緩衝材ブロック、横置きPEMにおける膨潤後の有効粘土密度に対応する緩衝材厚さの関係
5.考慮すべき項目に関する記載内容	・対象としている材料：緩衝材ブロック、PEM 緩衝材ブロックの場合、自己シール性を有する下限を示すグラフと製作施工上の上限を示すグラフとの間で、1.4Mg/m <sup>3</sup> に対して 700mm が与えられる。PEM の場合は、自己修復性を表す下限を表すグラフと製作・施工上の上限を示すグラフとの間で、1.275Mg/m <sup>3</sup> に対して 700mm が与えられる。
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	PEM方式の場合は、緩衝材の外側の隙間が存在しない製作方法を採用可能であり、自己シール性の仕様成立範囲はより広範囲になる。
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	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 (2016年9月21日、大阪) 資料-4 「(3) 処分場の設計と工学技術」 P.4-21
9.その他	このグラフの出典は、JNC TN8400 99-096 緩衝材設計の考え方に、現場締固めと緩衝材ブロックについて、p.15～18に示されている。

緩衝材機能に係る文献調査 (56)

1.番号	No.204
2.文献名	「(3) 処分場の設計と工学技術」許容できる緩衝材流出量の設定
3.執筆者	窪田 茂
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計・施工】許容できる緩衝材流出量の設定
5.考慮すべき項目に関する記載内容	最大膨潤率 / 隙間堆積比 $>2$ と緩衝材の累積流出量[Mg]の関係と平均乾燥密度 $[Mg/m^3] >1$ と緩衝材の累積流出量[Mg]の関係から緩衝材の許容流出量を $1.3Mg/m^3$ とした。
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	—
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	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 (2016年9月21日、大阪) 資料-4 「(3) 処分場の設計と工学技術」 P.4-83
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (57)

1.番号	No.205
2.文献名	「(3) 処分場の設計と工学技術」許容湧水量の基準値の設定
3.執筆者	窪田 茂
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】3つの岩種（深成岩、新第三世紀堆積岩、先新第世紀堆積岩）を対象として、文献番号No.204で示された緩衝材の許容流出量に対応する湧水量の基準値が設定された。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	処分坑道に対して、一本目の処分孔に廃棄体を定着してから、その上の処分坑道を埋め戻すまでの期間に対応して、 深成岩：2.8[L/m <sup>3</sup> ] 新第三世紀堆積岩：3.0[L/m <sup>3</sup> ] 先新第世紀堆積岩：1.7[L/m <sup>3</sup> ] が湧水量の基準値として設定された。
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	—
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	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（2016年9月21日、大阪）資料-4「(3) 処分場の設計と工学技術」P.4-84
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (58)

1.番号	No.206
2.文献名	「(3) 処分場の設計と工学技術」湧水量の設定（緩衝材の滴水対策の観点から）
3.執筆者	窪田 茂
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計・施工】緩衝材ブロックの施工時間を480分/孔とした場合の、緩衝材の滴水対策の観点から算出された許容湧水量
5.考慮すべき項目に関する記載内容	許容湧水量は、 $6.3 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{分}$ （0.63 L/分）と設定された。
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	—
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	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（2016年9月21日、大阪）資料-4「(3) 処分場の設計と工学技術」P.4-85
9.その他	—



緩衝材機能に係る文献調査 (59)

1.番号	No.207
2.文献名	「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」第IV章 処分場の設計に関する検討 4.1 人工バリアの設計・製作 4.1.2 緩衝材 4.1.2.2 緩衝材の設計
3.執筆者	核燃料サイクル開発機構
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】緩衝材の設計要件が示された。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<p>設計要件として、安全確保のための要件4項目、人工バリアが成立するための要件6項目が示された。</p> <p>安全機能に係る要件</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 低透水性を有すること：低透水性を有することにより、緩衝材中の地下水の動きを遅くして、結果的に緩衝材中の物質の動きが遅くなるようにするとともに、ガラス固化体の溶解速度や核種の溶出を抑制すること。</li> <li>2) 高い収着性を有すること：ガラス固化体から放射性核種が溶解した場合、それを収着することによって放射性核種の移動を抑制すること。</li> <li>3) コロイドフィルトレーション機能を有すること：放射性核種がコロイドとして移動することを妨げること</li> <li>4) 化学的緩衝性を有すること：地下水のpHや還元性等を化学的に緩衝することにより地下水の科学的条件を好ましいものとする事と。</li> </ol> <p>人工バリアが成立するための要件</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 自己シール性を有すること：水を含んだ際の膨潤性により、定置時の周辺岩盤戸の隙間や緩衝材内に生じた隙間を充填できること。</li> <li>2) 施工可能な締固め特性を有すること：既存の技術によって所要の密度が得られるような締固め特性を有すること。</li> <li>3) 施工可能な強度を有すること：ブロック方式による施工を想定した場合、据え付け字のハンドリングに必要な力学特性を有していること。</li> <li>4) 変形能を有すること：廃棄体埋設後、オーバーパックの機能が維持される期間、オーバーパックの腐食膨張と岩盤のクリープ変形を力学的に緩和できること。</li> <li>5) 力学的に安定に支持できること：廃棄体埋設後、オーバーパックの機能が維持される期間、オーバーパックを力学的に安定に支持でき、地震に対しても健全性を維持できること。</li> </ol>

	<p>6) 良好な熱伝導性を有すること：良好な熱伝導性を有することにより、ガラス固化体の発熱を外部に伝え、ガラス固化体の安定な形態を損なうような熱による変質を生じさせないこと。人工バリアの性能にかかわる熱移動、水分移動、核種移動、応力緩和などに関する性質に優位な影響を及ぼすような緩衝材の熱的な変質が生じないこと。</p>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<p>緩衝材の仕様設定については、以下の通り。</p> <p>1) 緩衝材はクニゲル V1 を用いた Na 型ベントナイトとする。この場合、ベントナイト 70%、ケイ砂 30%で乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>とする</p> <p>2) 緩衝材ブロックの厚さは、オーバーパック耐圧厚さと緩衝材厚さの関係から 70cm とすること。また、現場締固め方式とブロック方式の場合において、自己シール性を満足する値以上であり、かつ、オーバーパックの厚さが 15cm を超えない緩衝材の密度範囲から、緩衝材厚が 70cm であることは、十分余裕のある値である。</p>
7.緩衝材の整理の基軸	
8.出典	<p>「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ 分冊2 地層処分の工学技術 (1999)」、核燃料サイクル開発機構、平成11年11月26日、JNC TN1400 99-022</p>
9.その他	

緩衝材機能に係る文献調査 (60)

1.番号	No.208
2.文献名	「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」第IV章 処分場の設計に関する検討 4.1人工バリアの設計・製作 4.1.2緩衝材 4.1.2.3緩衝材の製作・施工技術に関する検討
3.執筆者	核燃料サイクル開発機構
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】緩衝材の施工要件として示された内容。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	緩衝材の制作・施工技術として、現場締固め方式、ブロック定着方式、吹付工法の3つが示された。
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<p>1) 現場締固め方式では、含水比=15% 管理値=15±2%、締固め後の乾燥密度=1.65Mg/m<sup>3</sup>が示されている。緩衝材ブロックは、最大乾燥密度 1.92 Mg/m<sup>3</sup>、最適含水比 13.6%となった。縦置き方式では、全断面締固め施工のみで良い掘削工法、あるいは全断面締固めと部分締固めを併用して用いる内枠工法あるいは、直接工法が実現性が高い。</p> <p>2) ブロックの場合、現場施工と比べ含水比、乾燥密度のばらつきが小さく制作できる。隙間を充填した時の緩衝材の平均乾燥密度は 1.703 Mg/m<sup>3</sup>であった。緩衝材ブロックの分割数については、縦置き方式では、無分割ないしは4分割が候補であり、横置き方式については、6分割が候補である。</p> <p>3) 吹付工法の場合は、鉛直下向きに厚さ 10~20cm/層、15秒/回の締固めで 1.5~1.7Mg/m<sup>3</sup>の乾燥密度が得られている。吹付工法の施工性、品質については、今後の検討を進めることが述べられている。</p>
7.緩衝材の整理の基軸	<p>緩衝材の膨出対策として、以下の項目が示された。</p> <p>人工バリアに用いる緩衝材は膨潤性の材料であることから、地下水の浸潤にともなって膨潤する。これによって緩衝材の一部が処分坑道や処分孔からはらみ出して、その密度が低下することが懸念されるため、処分坑道の膨出に対する対策として、コンクリートプラグを坑道に設置すること、処分孔の膨出に対しては、処分孔の上にキャップとなる上蓋を設置し、これをアンカーボルトで固定する方法、天盤支持方式として鋼材を組み合わせる方法が提案された。</p>
8.出典	「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ 分冊2 地層処分の工学技術 (1999)」、核燃料サイクル開発機構、平成11年11月26日、JNC

	TN1400 99-022
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (61)

1.番号	No.302
2.文献名	標準委員会セッション 2「低レベル放射性廃棄物の埋設地に係る覆土の施工方法及び施設の管理方法」：201X 改定標準案の概要について (1) 標準改定の経緯、目的、標準全体概要の紹介
3.執筆者	新堀 雄一，吉原 恒一，関口 高志
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】原子燃料サイクル専門部会及びLLW埋設後管理分科会では、平成26年8月より改定のための審議を再開し、標準改定案を取りまとめた。これは低レベル放射性廃棄物のピット処分及びトレンチ処分の埋設地に係る覆土の施工方法及び埋設地の管理に必要な施設の管理方法に適用するもので、廃棄物埋設地における段階管理による安全確保の方策、覆土の施工方法、保安のために講ずべき措置（監視、埋設地の保全、定期的な評価等）及び記録などを規定している。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	—
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	・対象としている材料：ピット処分及びトレンチ処分の覆土
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	日本原子力学会 2016年秋の大会 PL2C01
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (62)

1.番号	No.303
2.文献名	標準委員会セッション2「低レベル放射性廃棄物の埋設地に係る覆土の施工方法及び施設の管理方法」：201X 改定標準案の概要について (3) 新規制基準に対応した主な標準改定内容について [2] (箇条 5 覆土の施工方法、箇条 6 保安のために講ずべき措置)
3.執筆者	新堀 雄一，吉原 恒一，関口 高志
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計・施工】ピット処分及びトレンチ処分の覆土は、以下の管理措置の目的を考慮して設計及び施工する。 ・陥没のような大きな変形が生じる原因となる空隙が残らないこと ・埋設設備や埋設した物が容易に露出しないこと
5.考慮すべき項目に関する記載内容	緩衝材の特性評価方法：覆土に止水性能を期待してベントナイトを配合する場合の配合率と透水係数の関係を提示。
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	・対象としている材料：ピット処分及びトレンチ処分の覆土 ・緩衝材の設計要件：覆土の厚さを確保するために、覆土の変形量の予測評価結果に基づいて、必要に応じて、変形に対して余盛り（覆土の施工後の変形(沈下)を見越して、施工直後の覆土厚さを設定すること）又はこれに類する措置を講じる。
7.緩衝材の整理の基軸	覆土の施工方法の選定に当たり、施工時の雨水及び湧水対策を十分に検討し、覆土材の技術的要件を確保できるような施工方法を選択する。 施工機械の選定にあたっては、覆土材の締固め特性を把握し、十分な締固め能力をもつ機械を選択するとともに、ピット処分における埋設設備に接する部分又は狭隘部、又はトレンチ処分における埋設した物の周辺部分、及び周辺地盤に接する部分についても覆土材の技術的要件を確保できるよう留意する。
8.出典	日本原子力学会 2016年秋の大会 PL2C03
9.その他	施工時の気象条件が覆土材の技術的要件を確保するために適切でないと判断される場合には、施工を中断する。トレンチ処分において埋設した物の空隙に起因して覆土に陥没のような大きな変形が生じるおそれがある場合には、空隙を充填する又はこれに準ずる施工上の適切な措置を講じる。

緩衝材機能に係る文献調査 (63)

1.番号	No.309
2.文献名	Na 型ベントナイトへの過飽和ケイ酸の析出挙動
3.執筆者	笹川 剛, 千田 太詩, 新堀 雄一
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】 HLW 処分場の処分坑道埋戻し材に Na 型ベントナイトが使用され、埋戻し部に水みちが形成された場合でも、セメント系材料が用いられていることに起因する pH 勾配により、ケイ酸が析出し流路閉塞が期待できる。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：過飽和ケイ酸の析出挙動が長期間継続することによって地下水流路が狭隘化し、核種移行の遅延が期待される。</li> <li>・緩衝材の設計要件：－</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：－</li> <li>・緩衝材の施工方法：－</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料：Na 型ベントナイト（クミネ工業社製クニゲル V1）</li> <li>・岩盤内亀裂を想定して、流路の代表長さ(100m)、初期流速(5m/year)、比表面積(106 1/m)から析出反応と移流の比を表す無次元数であるダムケラー数を算出すると、<math>10^3</math> を超える大きな値となる。これは地下水移行に対して析出反応が顕著に生じることを示す。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Na 型ベントナイトが混在する埋め戻し部に水みちが形成された場合にも、ケイ酸析出による流路閉塞が期待できる可能性が示唆された。</li> </ul>
8.出典	日本原子力学会 2016年秋の大会2D16
9.その他	セメント使用に起因する pH 勾配によって生じる過飽和ケイ酸が処分坑道埋め戻し部のベントナイトへ析出する事象を想定する。



緩衝材機能に係る文献調査 (64)

1.番号	No.314
2.文献名	総合講演・報告3 原子力発電環境整備機構 (NUMO) [バックエンド部会共催] 地層処分セーフティケース
3.執筆者	藤山 哲雄, 太田 久仁雄, 鈴木 覚, 藤崎 淳, 出口 朗, 梅木 博之
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】「NUMOセーフティケース」の概要。NUMOセーフティケースは、文献調査 段階以降に候補サイトを対象に作成・更新していくセーフティケースの雛型となることを意図しており、実際のサイト調査の段階で行う作業を念頭に置き、最新の科学的知見や技術を反映し、事業を進めていくなかで想定される現実的な技術的制約条件などへの対応を具体的に提示する。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：地下水浸潤状況、流量、隙間量</li> <li>・緩衝材の設計要件：候補母岩として想定される深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類の三つの岩種分類の地質環境モデルを対象とする。</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：降水系地下水だけでなく、塩水系地下水の環境にも適用可能である。</li> <li>・緩衝材の施工方法：従来の縦置き・ブロック方式に加え、横置き・PEM方式について操作方法を示した。これらは処分坑道内における定置作業の効率化や坑道面積の縮小化が図れること、さらに坑道内の湧水や滴水などの環境に対する適用性が高いといった特長がある。</li> <li>・従来検討されていたフォークリフトによる定置方式から、構造躯体の上部を走行する天井クレーンによる定置方式に変更するなど、安全性と工学的成立性の両面から操作方法を見直した。</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	—
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	日本原子力学会 2016年秋の大会 PL2D01,PL2D03,PL2D04
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (65)

1.番号	No.322
2.文献名	NUMO セーフティケースの開発 (6) FEP データベースの開発と安全評価におけるデータセット
3.執筆者	黒澤 進, 浜本 貴史, 澁谷 早苗, 石田 圭輔, 藤本 秋恵, 稲垣 学, 藤崎 淳, 石黒 勝彦, 塚本 政樹
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】3岩種（深成岩、新第三期堆積岩、先新第三期堆積岩）に関して地下水水質を設定し、溶解度、緩衝材の拡散係数と分配係数、母岩の分配係数に関する核種移行データを設定した。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：－</li> <li>・緩衝材の設計要件：－</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：拡散係数、分配係数</li> <li>・緩衝材の施工方法：－</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料：－</li> <li>・溶解度に関しては、各地下水水質を基に、緩衝材間隙水化学モデルを用いて緩衝材の間隙水水質を導出し、評価対象元素に関する適切な溶解度制限固相との化学平衡計算により溶解度を算出した。</li> <li>・緩衝材の実効拡散係数（<math>De</math>）は、評価対象元素の化学種の電荷を考慮し、JAEA-DDB及び最新の文献情報から関連する実測データを抽出し、緩衝材仕様（ベントナイトの種類、ケイ砂混合率、乾燥密度等）や緩衝材間隙水のイオン強度に相応する値を設定した。</li> <li>・緩衝材の分配係数（<math>Kd</math>）は、緩衝材間隙水水質、核種の化学種、及び緩衝材の仕様に対応する緩衝材中の見かけの拡散係数（<math>Da</math>）と <math>De</math>の実測データをJAEA-DDBより抽出し、<math>Kd = (De/Da - \epsilon) / \rho</math> の関係式（<math>\epsilon</math>：間隙率、<math>\rho</math>：有効モンモリロナイト密度）より設定した。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	－
8.出典	日本原子力学会 2016年春の年会 1E06
9.その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実効拡散係数（<math>De</math>）は、実測値が乏しいあるいは存在しない場合には <math>De</math>推定モデルにより設定した。</li> <li>・母岩の <math>Kd</math>は、地下水水質、核種の化学種、岩種に応じて、JAEA-SDBからバッチ法により測定されたデータを中心にデータを抽出、統計処理して設定した。実測値が乏しいあるいは存在しない場合には、化学アナログによる設定や、GC（Generalized Composite）モデルやCA（Component Additivity）モデル等の収着モデルの適用性の検討に基づき設定した。</li> </ul>

緩衝材機能に係る文献調査 (66)

1.番号	No.328
2.文献名	地層処分場周辺の温度条件におけるCa型ベントナイトに対する過飽和ケイ酸析出挙動の評価
3.執筆者	笹川 剛、千田 太詩、新堀 雄一
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】 処分場の建設に用いられるセメント系材料によって地下水が高アルカリ化し、処分場周辺ではベントナイト等からその主成分であるケイ酸が溶出する。この高濃度のケイ酸が地下水の混合に伴って過飽和となりベントナイトに析出することで間隙が狭められ、核種移行を抑制する効果が期待できる。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 緩衝材に生じる挙動に関する事象：Ca 型ベントナイトへの過飽和ケイ酸の析出挙動</li> <li>・ 緩衝材の設計要件：－</li> <li>・ 緩衝材の特性評価方法：－</li> <li>・ 緩衝材の施工方法：－</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 対象としている材料：Ca型ベントナイト (Na型ベントナイト (クニゲルV1) より調整)</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 処分場周辺の温度条件におけるCa 型ベントナイトへの過飽和ケイ酸の析出が同等の核種移行抑制効果を示す可能性がある。</li> <li>・ 高温条件下(50°C)において固相への析出量が増加し、コロイド状ケイ酸が減少した。これは、高温条件下でコロイド状ケイ酸の成長が促進されて沈殿し、固相とともに分離されたことが原因であると考えられる。</li> </ul>
8.出典	日本原子力学会 2016年春の年会 2F12
9.その他	本実験の種々のパラメータに対して析出速度定数 $k$ [m/s]はいずれも $10^{-12} \sim 10^{-11}$ m/s の範囲に収まった。これは温度や過飽和濃度が変化するような複雑な系においても、析出速度定数を簡便に整理できることを示す。

緩衝材機能に係る文献調査 (67)

1.番号	No.330
2.文献名	NUMOセーフティケースの開発 (3) 処分場の設計と工学技術
3.執筆者	鈴木 覚, 藤崎 淳, 山本 陽一, 窪田 茂
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】 NUMOセーフティケースの作成にあたっては, サイト選定において想定される現実的な地質環境や操業環境において, 安全性を有し, かつ実用的な工学技術で処分場を建設・操業するための方法論の整備とその適用性の評価を実施した。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象: 塩水環境における膨潤挙動</li> <li>・緩衝材の設計要件: 首尾一貫した安全性と実現性の説明が可能となるように要件管理手法の適用に取り組み, 処分場に対する要求事項(閉鎖後および閉鎖前安全性確保, 実用性, 回収可能性, 経済的合理性など)を明確にした上で設計要件を体系的に設定した。</li> <li>・緩衝材の特性評価方法: 塩水環境における膨潤性能などの知見が拡充されたため, 設計基準の再検討を進めている。</li> <li>・緩衝材の施工方法: 従来の縦置き・ブロック方式に加え, 横置き・PEM方式について概念検討を進めている。</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	—
7.緩衝材の整理の基軸	—
8.出典	日本原子力学会 2016年春の年会 IE03
9.その他	—

緩衝材機能に係る文献調査 (68)

1.番号	No.341
2.文献名	埋め戻しによって形成される Ca 型ベントナイトへの過飽和ケイ酸の析出挙動
3.執筆者	笹川 剛, 千田 太詩, 新堀 雄一
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】セメント成分の浸出は地下水を高アルカリ化(pH 12~13)し、周辺のケイ酸塩鉱物から主成分であるケイ酸を溶出させる。このケイ酸含有高アルカリ地下水が下流に広がることでpHが通常の地下水程度まで下がり、溶解度の低下に伴い過飽和となったケイ酸が周辺のベントナイト等の固相に析出することが考えられる。このようなケイ酸の空間的な再分配は、地下水シナリオにおける核種移行に影響を及ぼす。 本研究では、Ca 型ベントナイトに対する過飽和ケイ酸の析出実験により、ベントナイトへのケイ酸析出挙動についての基礎的知見を得た。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：Ca 型化したベントナイトと、セメント成分の浸出によるケイ酸の溶出による、岩石亀裂の閉塞の可能性</li> <li>・緩衝材の設計要件：Ca 型化した Na 型ベントナイトとセメント成分の析出による効果</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：Ca 型ベントナイトもケイ酸の空間的な再分配に大きく寄与し、既存の地下水流路の局所的な3次元的な構造や流路表面の化学的性質に影響を及ぼす可能性がある。</li> <li>・緩衝材の施工方法：－</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	・対象としている材料：Ca 型ベントナイト (Na 型ベントナイト (クニゲル V1) より調整)
7.緩衝材の整理の基軸	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水溶性ケイ酸の減少と Ca 型ベントナイトへの析出の増加が確認された。過飽和ケイ酸濃度の大きい条件においては、実験開始直後に急激に析出量が増大し、その後は緩やかに析出が進行した。</li> <li>・これは、層状構造に起因するベントナイトの大きな表面積が、多量の過飽和ケイ酸の析出により層状構造端部を埋められたため、急激に減少したことが原因であると考えられる。</li> </ul>
8.出典	日本原子力学会 2015年秋の大会 H34
9.その他	・固相への析出量の経時変化から算出した析出速度定数 $k$ [m/s]は、ケイ酸析出による岩石亀裂の閉塞の可能性を示した先行研究[1]と同程度となった( $10^{-12}$ ~ $10^{-10}$ m/s)。

	<p>[1]SASAGAWA et al. , “Effects of Supersaturated Silicic Acid Concentration on Deposition Rate around Geological Disposal System”, Proceedings of ICONE23, 2015.</p>
--	--

緩衝材機能に係る文献調査 (69)

1.番号	No.343
2.文献名	廃棄体回収のための緩衝材除去装置の開発 (1) 全体概要
3.執筆者	朝野 英一, 塚原 成樹, 岩谷 隆文, 戸栗 智仁, 矢萩 良二
4.設計・施工への反映 すべき知見	【施工】高レベル放射性廃棄物地層処分の作業期間中を対象とした回収技術として塩水を用いた緩衝材除去技術を開発し、実材料を用いた実規模スケールの地上試験を実施した。
5.考慮すべき項目に 関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：－</li> <li>・緩衝材の設計要件：－</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：－</li> <li>・緩衝材の施工方法：緩衝材の除去（廃棄体回収時）</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関 する整理の視点	－
7.緩衝材の整理の基 軸	－
8.出典	日本原子力学会 2015年秋の大会 H52
9.その他	－



緩衝材機能に係る文献調査 (70)

1.番号	No.344
2.文献名	廃棄体回収のための緩衝材除去装置の開発 (2) 装置開発
3.執筆者	朝野 英一, 塚原 成樹, 岩谷 隆文, 戸栗 智仁, 矢萩 良二
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】 処分孔縦置き方式を対象とした廃棄体を回収するための緩衝材除去システム（塩水噴射・吸引設備、塩水リユース設備、遠隔操作設備）の設計、製作、組立てを実施した。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：－</li> <li>・緩衝材の設計要件：－</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：－</li> <li>・緩衝材の施工方法：緩衝材の除去（廃棄体回収時）</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	－
7.緩衝材の整理の基軸	<ul style="list-style-type: none"> <li>・塩分濃度 4 wt%、噴射圧力 0.6MPa±0.5%、噴射ノズル径 φ2.2mm、下向きノズル数 32、横向きノズル数 16、噴射流量 15m<sup>3</sup>/h、吸引流量 15m<sup>3</sup>/h 以上</li> <li>・塩水リユース設備は、固液分離機能として、処理流量 15m<sup>3</sup>/h 以上</li> <li>・固液分離後のスラリーの濁度を浮遊物質濃度（SS 濃度）5,000mg/L 未満</li> </ul>
8.出典	日本原子力学会 2015年秋の大会 H53
9.その他	<p>遠隔操作設備では、制御性、監視性を重視した作業の安全性から設備の設計要件を設定し、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・模擬処分坑道内の移動</li> <li>・模擬処分孔における噴射・吸引設備による模擬廃棄体の把持</li> <li>・3Dカメラでの緩衝材除去形状の把握、位置調整・制御、塩水の噴射、スラリーの吸引（除去）、塩水リユース設備による固液分離、塩水成分の調整と循環</li> </ul> <p>に関する動作を確認した。</p>

緩衝材機能に係る文献調査 (71)

1.番号	No.345
2.文献名	廃棄体回収のための緩衝材除去装置の開発 (3) 緩衝材除去装置による実規模試験
3.執筆者	岩谷 隆文, 塚原 成樹, 朝野 英一, 矢萩 良二, 戸栗 智仁
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】緩衝材除去システムが有する緩衝材の除去機能、システムの成立性、操作性を確認した。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：－</li> <li>・緩衝材の設計要件：－</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：－</li> <li>・緩衝材の施工方法：緩衝材の除去（廃棄体回収時）</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料： 緩衝材（クニゲルV1、ベントナイト70wt%+ケイ砂30wt%） ペレット（クニゲルV1、ベントナイト100wt%）</li> <li>・模擬処分孔に外径φ2,260mmの円盤型（No.1、No.6 リング）、中空型（No.2～No.5リング）緩衝材および模擬廃棄体を設置し、定置直後の人工バリアの状態を構築した。</li> <li>・模擬廃棄体と緩衝材の隙間には粒状のベントナイトペレットを充填した。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	<ul style="list-style-type: none"> <li>・除去速度は、模擬廃棄体（模擬オーバーパック）上部では平均17.1mm/h、側部では平均22.9mm/hとなり、緩衝材深部になるほど除去速度が上昇する結果を得た。</li> </ul>
8.出典	日本原子力学会 2015年秋の大会 H54
9.その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材除去システムの試験条件は、使用する塩水の塩分濃度4 wt%、除去時の噴射圧力を0.6MPa±0.5%とした。</li> <li>・除去対象となるオーバーパック周辺の緩衝材を77 時間で除去し、模擬廃棄体の引上げを実施した。</li> </ul>

緩衝材機能に係る文献調査 (72)

1.番号	No.346
2.文献名	廃棄体回収のための緩衝材除去装置の開発 (4)3D計測技術の開発
3.執筆者	矢萩良二 竹内啓五 朝野英一 塚原成樹 岩谷隆文
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】3D計測技術を用いた遠隔制御の方法と、実規模スケール試験による計測結果について報告する。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：－</li> <li>・緩衝材の設計要件：－</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：－</li> <li>・緩衝材の施工方法：緩衝材の除去（廃棄体回収時）</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	－
7.緩衝材の整理の基軸	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材の除去形状および廃棄体位置を把握し、装置類が接触しないように制御する必要があり、除去装置前方部の把持装置直上に「除去形状情報」取得用の3Dスキャナを2基配置した。</li> <li>・広範囲の除去形状の取得を可能にするため、サーボ機構を装備し旋回しながら形状を合成、最終的に統合された点群情報として取得できるシステムとした。</li> </ul>
8.出典	日本原子力学会 2015年秋の大会 H55
9.その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・走行支援システム：道壁面離隔・車体姿勢情報」検知用の3Dスキャナを搭載し、本スキャナが取得する坑道側壁面の形状情報をもとに、壁面までの距離とその相対角度を計算するシステムを開発した。</li> <li>・廃棄体把持操作支援システム：模擬廃棄体の「把持部と把持装置との相対位置情報」を正確に把握する必要がある。3Dスキャナは「緩衝材除去形状取得支援システム」で用いた2基を利用した。</li> <li>・取得した点群のうち把持装置に近く、模擬廃棄体頭頂部の円形平面（約φ20cm）に含まれると考えられる点群座標のみを抽出し、重心位置を位置座標として計算可能なシステムとした。</li> </ul>

緩衝材機能に係る文献調査 (73)

1.番号	No.347
2.文献名	幌延URL における人工バリアの性能確認試験 (11)緩衝材、埋め戻し材およびコンクリートプラグの施工
3.執筆者	中山 雅, 大野 宏和, 棚井 憲治, 白瀬 光泰, 丹生屋 純夫, 下原 正弘
4.設計・施工への反映 すべき知見	【施工】幌延URLの深度350m調査坑道で実施している人工バリア性能確認試験では、実物大の模擬人工バリアを設置し、坑道の埋め戻しまでを行った。本試験では、堅置き方式を想定した試験孔内に緩衝材および模擬オーバーパックを設置し坑道を埋め戻したのち、埋め戻し部を閉塞するためにコンクリートプラグを設置した。
5.考慮すべき項目に 関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：－</li> <li>・緩衝材の設計要件：－</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：－</li> <li>・緩衝材の施工方法：緩衝材ブロック</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関 する整理の視点	－
7.緩衝材の整理の基 軸	<ul style="list-style-type: none"> <li>・坑道下半部は転圧締め固め、上半部は圧縮成形し、埋め戻し材ブロックにより坑道を埋め戻した。</li> <li>・埋戻し材には、現地から発生した掘削土(ズリ)とベントナイトの混合土を使用</li> </ul>
8.出典	日本原子力学会 2015年秋の大会 H57
9.その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・プラグ打設後の 2014 年 12 月から測定を開始し、試験開始前の初期状態の把握につとめる</li> <li>・2015 年 1 月には模擬オーバーパックに内蔵したヒーターによる加熱および原位置地下水の注水を開始した。</li> <li>・2015 年 5 月にはプラグ周辺の微細な隙間を閉塞するためのコンタクトグラウトを実施した。</li> </ul>

緩衝材機能に係る文献調査 (74)

1.番号	No.353
2.文献名	カリウムイオンが処分場ベントナイトに与える影響の検討 (1)K 型化ベントナイトの膨潤特性および透水性
3.執筆者	三好 悟, 木村 志照, 甚野 智子, 柴田 真仁, 三步一 孝, 佐藤 努
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】人工バリア材料として普通ポルトランドセメントが使用される場合、初期（閉鎖後1000年程度まで）は、NaイオンやKイオンを含む高いpHの液が浸出し、その後は、浸出液中の主な陽イオンはCaイオンとなる。初期の浸出液によりK型化したベントナイトについては、これまで多くのことが知られてきたわけではない。クニゲルV1（クニミネ工業）を塩化カリウム溶液で処理して得られたK型化ベントナイトがどのような特性を示すか実験的に調べた結果、膨潤量が元のベントナイトに比べて大幅に減少した。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：モンモリロナイトの交換性陽イオンがセメント浸出液に含まれる陽イオンに交換される反応</li> <li>・緩衝材の設計要件：－</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：－</li> <li>・緩衝材の施工方法：－</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料：クニゲル V1（クニミネ工業）を塩化カリウム溶液で処理して得られた K 型化ベントナイト</li> <li>・K イオンは Na イオンに比べて層間で水和力に乏しく、その結果ベントナイトの膨潤能力が低下したことが考えられる。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	－
8.出典	日本原子力学会 2015年春の年会 B23
9.その他	－

緩衝材機能に係る文献調査 (75)

1.番号	No.354
2.文献名	カリウムイオンが処分場ベントナイトに与える影響の検討 -(2) KOH 溶液による化学的変質挙動と間隙構造と透水性の変化-
3.執筆者	三好 悟, 木村 志照, 甚野 智子, 柴田 真仁, 三步一 孝, 佐藤 努
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】圧縮K型ベントナイトにKOHを通水し、化学的変質挙動、間隙構造と透水性の変化について試験を行った。アルカリによる溶解による密度低下、モンモリロナイトの溶解およびイライト化により膨潤力が低下することで著しく透水性が増加する。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象: モンモリロナイトの交換性陽イオンがセメント浸出液に含まれる陽イオンに交換される反応</li> <li>・緩衝材の設計要件: -</li> <li>・緩衝材の特性評価方法: -</li> <li>・緩衝材の施工方法: -</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料: クニゲル V1 (クニミネ工業) を KCl 溶液にて層間イオンを K に交換したベントナイト</li> <li>・アルカリによる鉱物の溶解が進み、密度低下が確認された。また、透水係数の変化は、イオン交換水通水のケースと比べて、0.3mol/L の KOH 通水で約 5 倍、1.0mol/L の KOH 通水で約 180 倍増加した。</li> <li>・アルカリによる溶解による密度低下と、イライト化による非膨潤性鉱物へ変質したことが透水性の増加に寄与したものと考えられる。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	-
8.出典	日本原子力学会 2015年春の年会 B24
9.その他	-

緩衝材機能に係る文献調査 (76)

1.番号	No.355
2.文献名	Ca型ベントナイト混合土のガス移行特性に関する検討 (3) 室内ガス移行試験結果に対する二相流パラメータ設定
3.執筆者	山本 修一, 古賀 和正, 新納 史朗, 熊谷 守
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】 Ca型ベントナイト混合土を対象として実施された室内ガス移行試験結果に対し, 既往の逆解析手法を用いて材料の二相流パラメータの同定と試験の再現解析を行った。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 緩衝材に生じる挙動に関する事象: ガス移行</li> <li>・ 緩衝材の設計要件: -</li> <li>・ 緩衝材の特性評価方法: 汎用逆解析コード (UCODE_2005) と二相流解析コード (GETFLOWS) を用いた逆解析手法により材料の二相流パラメータの同定を行い、試験の再現解析を行った。</li> <li>・ 緩衝材の施工方法: -</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 対象としている材料: 浅地中処分の難透水性覆土 (Ca 型ベントナイト混合土 (ベントナイト配合率 30%))</li> <li>・ 同定された二相流パラメータは、累積排水量および累積排気量ともに試験結果をよく再現できている。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	-
8.出典	日本原子力学会 2015年春の年会 B25
9.その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ガス移行試験で計測された排気量は供試体からの真の排気量とは異なる。そこで、仮定に基づいて解析で再現すべき供試体からの真の累積排水量、累積排気量および再現対象期間を設定した (仮定の詳細は報告書参照)。</li> </ul>



緩衝材機能に係る文献調査 (77)

1.番号	No.356
2.文献名	縦落し式混合装置で製造したベントナイト混合土の吹付け施工試
3.執筆者	久慈 雅栄, 飯島 健
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】放射性廃棄物処分場等において適用が考えられているベントナイト混合土の製造方法として、縦落し混合・加水方式を採用したミストブレンダー工法を開発した。Na型ベントナイト混合土を製造するとともに吹付け施工試験を実施し、良好な製造の確認と吹付け設備の改良効果や吹付けられた材料の各種土質特性等の結果を得た。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：－</li> <li>・緩衝材の設計要件：低透水性</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：乾燥密度、透水係数</li> <li>・緩衝材の施工方法：ミストブレンダー工法による製造、吹付け工法による施工</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料：Na型ベントナイト混合土 (Na型クニゲルV1：青森県産砂＝15：85)</li> <li>・低透水性：ミストブレンダー工法のNa型ベントナイト混合土への適用性は良好であり、含水比14.5%付近で吹付けした材料の乾燥密度1.65g/cm<sup>3</sup>、透水係数1.5E-11m/s程度が得られた。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	－
8.出典	日本原子力学会 2014年秋の大会 F10
9.その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・吹付けノズルおよび吹付けホースに付着防止加工を施すことにより、加工前に比べて付着等の不具合を大幅に抑制することができた。</li> <li>・吹付けした材料の乾燥密度は、1Ec締固めの90[%](D値90[%])程度を示し、含水比14.5[%]付近で乾燥密度1.65[g/cm<sup>3</sup>]程度となる。</li> <li>・吹付け試験におけるリバウンド率は、10[%]程度である。</li> <li>・リバウンド材は粗粒分が多く、相対的に吹付け材の細粒分比率が上昇したことが、1Ec締固め材よりも透水係数が小さくなる要因のひとつと考えられる。</li> </ul>

緩衝材機能に係る文献調査 (78)

1.番号	No.363
2.文献名	幌延URLにおける人工バリアの性能確認試験 (8)緩衝材中の計測計画
3.執筆者	城 まゆみ, 本島 貴之, 丹生屋 純夫, 白瀬 光泰, 中山 雅, 棚井 憲治
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計・施工】幌延URLの深度350m調査坑道で実施する、人工バリア性能確認試験では、実物大の模擬人工バリアを設置し、坑道の埋め戻しまでを行う計画である。本試験では、緩衝材内に腐食電位計、土圧計、間隙水圧計等を設置するとともに、比抵抗トモグラフィにより緩衝材への地下水の浸潤状況を計測する。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：地下水浸潤</li> <li>・緩衝材の設計要件：－</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：－</li> <li>・緩衝材の施工方法：緩衝材ブロック</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料：－</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	<ul style="list-style-type: none"> <li>・試験孔は、縦置き方式を想定した直径 2.4m、岩盤深さ 4.2m の大口径の孔である。</li> <li>・模擬オーバーパック内の加熱用ヒーターを熱源として作用させ、各段階で設置する計測機器によってプラグ設置後からの熱－水－応力－化学連成現象の各種データを取得する。</li> </ul>
8.出典	日本原子力学会 2014年秋の大会 F18
9.その他	－

緩衝材機能に係る文献調査 (79)

1.番号	No.365
2.文献名	坑道すき間へのベントナイト・ペレット充てん方法の高度化の試
3.執筆者	石井 卓, 中島 均, 斉藤 亮
4.設計・施工への反映すべき知見	【施工】PEMと坑道内壁との間の狭いすき間空間にベントナイト・ペレットを充てんする埋戻し方法のさらなる高度化をめざした小規模な室内実験を実施し、目視により充てん性を簡易に確認できることの見安を得た。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：－</li> <li>・緩衝材の設計要件：製作施工性</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：</li> <li>・緩衝材の施工方法：ペレット充てん方法</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料：ベントナイトペレット（粒径：1、2、4、20mm）</li> <li>・製作施工性： <ul style="list-style-type: none"> <li>大小 2 粒径の混合ペレットを充てんする場合に、振動締固めは得策ではなかった。</li> <li>内径 100mm 高さ 127mm の透明円筒容器に大粒径ペレット 20 mm 級を先行して充てんし、その後、小粒径ペレットを大粒径の間隙に充てんする方法を試みた。小粒径ペレット 1mm 級は大粒径の間隙に流れ落ちるため充てん密度が 1.49Mg/m<sup>3</sup> で良好であった。</li> <li>粒径が 2mm 級、4mm 級の小粒径ペレットは大粒径 20 mm の間隙にうまく充てんできず、充てん密度は 1.27 Mg/m<sup>3</sup> 以下であった。</li> <li>内径 100mm の透明円筒容器の中で、大粒径ペレットの先行まきだし層厚を 20mm から 500mm まで変えて、1mm 級ペレットを上端から流れ落とすことで大粒径間隙へ充てんする実験を行った。充てん密度は 1.49～1.52 Mg/m<sup>3</sup> の範囲ですべて良好であった。</li> <li>幅 350mm, 高さ 255 mm, 奥行き 100 mm の透明型枠への充てん実験を実施し、大粒径と小粒径を交互に斜面状にまきだしてから、エア噴射により敷き均すという充てん方法の有効性を確認した。</li> </ul> </li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	－
8.出典	日本原子力学会 2014年春の年会 I07
9.その他	－

緩衝材機能に係る文献調査 (80)

1.番号	No.366
2.文献名	浅地中処分における分配係数の測定 (1)ベントナイト混合土の分配係数について
3.執筆者	野下健司 見付樹大 好井直樹
4.設計・施工への反映すべき知見	【設計】浅地中ピット処分施設の難透水性覆土の材料として、ベントナイト混合土を検討している。本研究では、核種を陽イオン核種、陰イオン核種、金属イオン核種、 $\alpha$ 核種の4つのグループに分類し、ベントナイトの初期材質、長期的な化学変質、地下水塩濃度などが分配係数に及ぼす影響について体系的にデータ取得し、今後より高い信頼性で安全評価を実施することが可能となった。
5.考慮すべき項目に関する記載内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材に生じる挙動に関する事象：－</li> <li>・緩衝材の設計要件：核種の収着機能</li> <li>・緩衝材の特性評価方法：分配係数</li> <li>・緩衝材の施工方法：－</li> </ul>
6.緩衝材の仕様に関する整理の視点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象としている材料：浅地中ピット処分施設の難透水性覆土（Ca型モンモリロナイトを主成分とするクニボンド 30wt%と、石英、斜長石を主成分とする陸砂 70wt%を混合したベントナイト混合土）</li> <li>・核種の収着機能：陽イオン核種については地下水塩濃度の影響が最も大きく、陰イオン核種については、ベントナイト混合土がセメント材料由来のカルシウムと反応する化学変質の影響が大きいことがわかった。金属イオン核種、<math>\alpha</math>核種は原子価によって大きく挙動が異なり、地下水塩濃度の影響を受けることがわかった。</li> </ul>
7.緩衝材の整理の基軸	<ul style="list-style-type: none"> <li>・浸漬液は、地下水分析の結果を反映し、pH～9に調整した模擬地下水を用いた。液固比は 10mL/g とした。</li> <li>・核種は表 1 に示す 10 種類を用い、室温・大気雰囲気ですべて 7 日間浸漬し、孔径 0.45<math>\mu</math>m フィルターでろ過した後の溶液中の核種濃度から分配係数を算出した。</li> <li>・フィルターでろ過した後の溶液中の核種濃度から分配係数を算出した。また、核種の初期濃度は、液相に添加した濃度ではなく、固相を添加しないブランク溶液に核種を添加し、7 日間浸漬させ、その後、ろ過した溶液中の核種濃度を用いた。</li> </ul>
8.出典	日本原子力学会 2014年春の年会 I18
9.その他	－

<添付資料 C>

横置き定置方式, KBS-3H に関するレポート

## 概要

KBS-3Hは、KBS-3概念のバリエーションの1つであり、レファレンス設計であるKBS-3Vの代替策の1つである。横置き定置方式は、1990年代後半からスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB社）とフィンランドのポシヴァ社が共同で研究してきたものであり、この作業はKBS-3Vの開発と並行して進められてきた。KBS-3Hの場合、使用済核燃料が収納された一連の多重キャニスタが深度約400～500 mの基盤岩内に平行に配置される長さ100～300 mのほぼ水平な定置横坑に定置されるが、KBS-3V設計の場合、個別の定置孔にキャニスタが鉛直方向に定置されることになる。

本報告書では、SKB社とポシヴァ社がKBS-3Hに関する研究を行ってきた動機、比較的初期の開発作業のレビュー、またごく最近のプロジェクト・フェーズである「2011～2016年システム設計フェーズ」に関するより詳細な説明を示した上で、今後の課題として残っているKBS-3H開発作業に関する検討と、全体的な結論とを示す。本報告書は一定数の関連文書に基づくものであり、これらの文書はより詳細な情報の入手のために参照される。

ごく最近行われたプロジェクト・フェーズの主な目標は、KBS-3Hシステム設計の開発を行い、KBS-3H処分場に関する長期安全性評価を実施することにある。

KBS-3Hに関する長期安全性評価は現在、現行プロジェクト・フェーズでレファレンス・サイトとして使用されているポシヴァ社のオルキルト・サイトを対象に実施されている。総括報告書としては、『KBS-3H設計基準』の更新版、『処分システムの記述』、『特性、事象及びプロセス報告書』及び『性能評価』が挙げられる。

最近のプロジェクトにおける設計面での主な焦点は、KBS-3H定置横坑に組み込まれる緩衝材及び充填材要素の設計を更新する作業に合わせられている。もう1つのタスクは、ベントナイト緩衝材の初期の膨潤挙動と横坑の乾燥及び湿潤条件のもとでの膨潤圧の拡大に関する大スケール試験から情報を入手することである。

十分な真直度を伴う300 mの長いパイロット孔の掘削が可能であることを実証するために、エスポHRL及びONKALOにおいて掘削作業が行われている。

以前には1つずつ試験されていたKBS-3H設計の鍵となる構成要素が、現在では「多目的試験」（MPT）と呼ばれる試験を通じてサブシステム・レベルで統合されている。この試験には、構成要素の製造、横坑の特性評価及び準備作業、地下における構成要素の組み立て及び設置と、その後のモニタリングが含まれている。

KBS-3Hを用いた処分の準備を整えるために行うべき開発作業がまだいくつか残っている。解決すべき鍵となる問題の1つとして緩衝材及び充填材の化学的浸食の問題が挙げられ、この問題は「システム設計段階」で行われた長期安全性評価の主な焦点の1つとされたものである。化学的浸食はKBS-3VとKBS-3Hの両方で起こる可能性があるが、1ヶ所におけるベントナイトの浸食が一定の水準を超える結果として生じうる緩衝材質量の再分配は、KBS-3Hの場合の方が重要なものとなる。これは、最も近いキャニスタの周囲の条件だけでなく、横坑沿いのその他のキャニスタの周囲の条件にも影響（いわゆるドミノ効果）が及ぶ可能性があるためである。

これ以外に残っているタスクの一部として、プラグやスーパーコンテナの詳細な設計や、グラウチング研究の継続が挙げられる。

全体として、最近のKBS-3Hシステム設計フェーズにより、水平方向の設計に関する知識水準が鉛直方向の設計のそれにより近いレベルにまで引き上げられている。これによって広範な情報をもたらされ、現在ではKBS-3概念の2つの設計代替策のより正確な比較が可能となっている。



# 目次

概要	1
1 はじめに	5
2 背景	6
2.1 KBS-3処分場の設計	6
2.2 KBS-3Hの全体的な設計	7
3 KBS-3H設計の開発（2001～2010年）	10
3.1 2001年	10
3.2 2002～2003年	11
3.3 2004～2007年	11
3.4 2008～2010年	13
4 KBS-3Hシステムの設計（2011～2017年）	15
4.1 システム設計フェーズの目標及び範囲	15
4.2 さまざまな構成要素の設計及び要件	17
4.2.1 横坑の概略的な説明	17
4.2.2 地下水の制御	19
4.2.3 人工注水と排気	20
4.3 緩衝材の設計	20
4.4 充填構成要素の設計	22
4.5 コンパートメント及び横坑プラグの設計	24
4.6 スーパーコンテナ・シェルとその他の2次的構成要素の設計	27
4.6.1 スーパーコンテナ・シェル	27
4.6.2 スプレーシールドとドリップシールド	27
4.6.3 人工注水と排気構成要素	28
4.6.4 パーキング用脚部	28
4.7 設置手法	29
4.8 大規模試験と実規模試験	33
4.8.1 緩衝材の膨潤圧の進展、「Big Bertha」（BB2-BB5試験）	33
4.8.2 過渡領域試験	39
4.8.3 実証	40
4.8.4 多目的試験（MPT）	40
4.8.5 エスポの新規KBS-3H試験サイトと操縦を伴うコアドリル掘削	48
4.8.6 ONKALOにおける操縦を伴うコアドリル掘削	52
4.8.7 スーパーコンテナを用いたヒーター試験	56
4.9 長期安全性に関する研究	61
4.9.1 岩盤せん断がキャニスタに及ぼす影響	61
4.9.2 化学的浸食	62
4.10 長期安全性評価	64
4.11 環境面での影響	64
4.12 操業安全性と職業安全	65
4.13 職業安全	65
4.14 回収可能性及び逆向きの操業	65
4.15 費用の見積り	67
5 今後行うべきKBS-3Hに関する開発作業	68
5.1 解決すべき共通問題	68
5.1.1 化学的浸食	68
5.1.2 KBS-3HとKBS-3Vに共通するその他の問題	68
5.2 解決すべきKBS-3Hに固有の問題	68
5.2.1 完全なセーフティケースの完成	68
5.2.2 MPTの解体	68
5.2.3 BB5試験の解体	69
5.2.4 プラグの詳細設計	69
5.2.5 スーパーコンテナの詳細設計	70

5.2.6	シリカゾルに関する研究.....	70
5.2.7	処分場深度でのポストグラウチングの実証（横坑のリーミング後）.....	71
5.2.8	耐食性の充填ブロック.....	71
5.2.9	設計最適化の可能性.....	71
5.2.10	操業、職業安全及び環境への影響.....	72
6	検討及び結論.....	73
6.1	実証.....	73
6.1.1	多目的試験（MPT）.....	73
6.1.2	ドリル掘削作業.....	74
6.1.3	加熱を伴うスーパーコンテナ試験.....	74
6.2	安全評価.....	74
	参考文献.....	76

## 1 はじめに

本報告書は、SKB社とポシヴァ社が共同で実施したKBS-3H概念の開発作業について説明するものである。内容のほとんどは現在のプロジェクト・フェーズである「KBS-3Hシステム設計」に関するものとなっている。また、まだ完了していない安全評価活動よりも、技術開発活動の方を詳しく取り扱った。しかし一部の安全評価活動や安全関連研究についても取り扱った。

本報告書では、すでに発行済の報告書と2017年春に発行予定の報告書の両方が、参考文献として挙げられている。

## 2 背景

### 2.1 KBS-3処分場の設計

SKB社とボシヴァ社の双方にとって、KBS-3レファレンス設計は縦置き方式に基づくものである。KBS-3V方式とKBS-3H方式との間には相違点よりも類似点の方が多いことを強調しておく事が重要であろう。この両方式とも、基本的には同じ多重バリア・システムを備えるものであり、力学的及び化学的に安定した基盤岩条件、寿命の長い人工キャニスタ、キャニスタの周囲への腐食材や水の流入を限定するために、またキャニスタが損傷を受けた場合に核種の移動を遅延させるためにキャニスタの周囲に設置される緩衝材に依拠している。したがってレファレンス設計であるKBS-3Vの研究で得られた情報の多くを、KBS-3Hにそのまま適用することができる。規制及び全体的な諸要件はKBS-3VとKBS-3Hで同じであるが、横置き定置の場合、建設及び定置の方法は異なったものとなる。さらに長期安全性に関する一部の問題についても、代替策のそれぞれにとっての問題の重要性又は生じうる影響の面で異なる可能性があるか、実際に異なっている。

以下の部分で、KBS-3VとKBS-3Hとの主な相違点を列記して説明する。

- 定置坑道が存在しない。
- 鉛直方向の定置孔の代わりに長い水平方向の定置横坑が使用される。
- 定置手法。
- ベントナイトの人工的な湿潤化。
- スーパーコンテナ及びコンパートメント・プラグ。

工学的な観点から見ると、KBS-3H処分場とKBS-3V処分場の建設（SKB 2010a）は、定置横坑の建設に至るまではむしろ似通ったものとなる。KBS-3Hの場合には横置き定置孔が使用されるために定置坑道を掘削する必要がなく、したがって定置後にそれらの坑道を埋め戻す必要もない。また定置作業面でも大きな違いがある。KBS-3H代替策の場合、キャニスタと埋め戻し材を収納した約46トンの重さの複数のスーパーコンテナを、長さが最長300 mの定置横坑に搬入する必要がある。その一方でKBS-3Vの場合、緩衝材が複数のステップを経て鉛直定置孔に降ろされることにより、重量が約25トンのキャニスタが定置される。

KBS-3H定置孔では、1つのキャニスタ位置に流入する水が最終的には次のキャニスタ位置へと進むことから、地下水流入への感度が高くなることが考えられる。したがってKBS-3H設計の場合の鍵となる検討事項の1つは、急速に発達する水圧差がもたらすリスクを最小限に抑えることである。その理由として、この種の水圧差により、間隔ブロックとスーパーコンテナの力学的な変位による移動や、緩衝材-岩盤境界面沿いの貫孔作用及び浸食が生じる可能性があることが挙げられる。選定されたレファレンス設計であるDAWEでは、これらの問題がかなりの程度まで排除されている。これは、流入する地下水が定置作業時に排水された上で、緩衝材が横坑全体で同時に加速された膨潤を開始できるよう、横坑への人工的な注水が行われるためである。

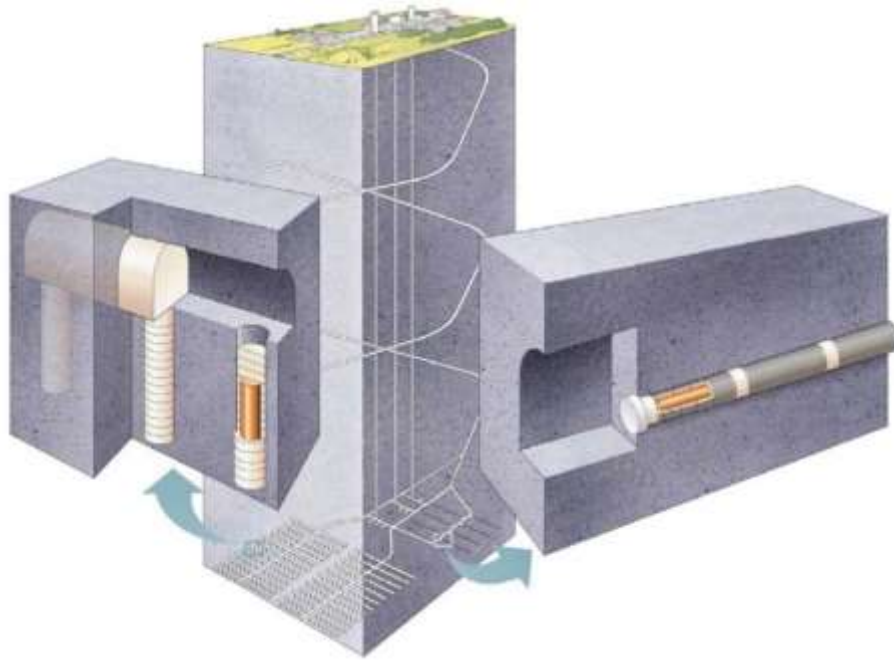


図2-1. KBS-3Vレファレンス設計（左側）とKBS-3H（右側）の概略図。

## 2.2 KBS-3Hの全体的な設計

KBS-3H開発作業の実際の出発点は、SKB社の2001年の「研究開発・実証（RD&D）プログラム」（SKB 2001a）であった。初期の作業で得られた重要な結論の1つは、キャニスタと緩衝材を、別個の構成要素としてではなく、統合された1つの廃棄物パッケージとして定置するべきだということであった。さまざまな定置手法が研究され、1つの廃棄物パッケージ（「スーパーコンテナ」）を開発するべきだという結論が示された。

KBS-3H設計代替策では、使用済燃料を収納した複数のキャニスタが、深度約400～500 m基盤岩内に平行して配置される長さ100～300 mのほぼ水平な定置横坑内に定置される（図2-2を参照）。

本報告書では、定置横坑内の構成要素に次に示す名称を使用する。

- 横坑入り口：主坑道と定置横坑が交差する場所。
- 横坑末端。
- 横坑プラグ。
- コンパートメント・プラグ（初期にはコンパートメント・プラグとも呼ばれていた）

訳者注。

直径1,850 mmの定置横坑は、主坑道のニッチからわずかに傾斜した形で掘削される。1本の定置横坑は、1つのコンパートメント・プラグで分離された2つのコンパートメント（それぞれ長さ～150 m）で構成される。外側のコンパートメントは横坑プラグ（コンパートメント・プラグとほぼ同じもの）によってシーリングされる。

1つのコンパートメント内では、熱を管理すると共に、それぞれのキャニスタ位置を次の

---

訳者注 原文のまま。

キャニスタの位置からシーリングによって遮断するために、さらには水とベントナイトの横坑沿いの移動を防止するために、スーパーコンテナは円筒形の「間隔ブロック」で分離される。この設計では、それぞれの横坑内に、使用済燃料のタイプに応じて約30~40体のスーパーコンテナが定置されることになる。充填のための構成要素は、位置決め規準に基づき、スーパーコンテナ又は間隔ブロックに使用できない位置に設置される（たとえば、長期安全の面での理由から、間隔ブロックを含むスーパーコンテナの位置への流入速度はグラウチング前の段階で0.1 l/分を下回っていなければならない）。充填ブロックは流入区画に使用され、過渡ブロックはベントナイト・ペレットと共にプラグに隣接する過渡領域を形成する。ペレット充填区画を除く全ての構成要素は、構成要素と横坑壁との間の隙間の幅が42.5 mmになるよう、横坑の中心軸に合わせて設置される。横坑構成要素は、定置装置を用いて設置される。この装置については文献 [Autio et al. 2008] でより詳細に説明されている。

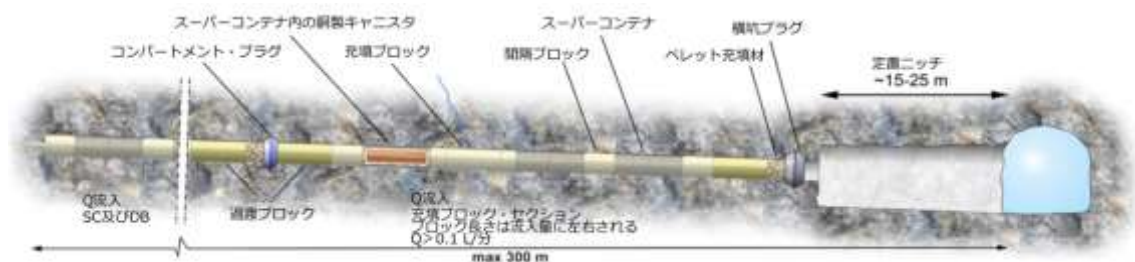


図2-2. KBS-3H横坑と主な構成要素の概略図。

#### KBS-3Hの開発が行われた理由

KBS-3Hの主な利点は、掘削すべき岩盤量が少なくなることである（KBS-3Vの場合の約60%）。これは、横置き方式では定置坑道の必要がないことの結果である。以下の部分で、KBS-3Hによって実現されると考えられている好ましい効果の例を挙げる。

- 建設及び処分時に、より高度に工業化されたプロセスを利用することができる（ドリル掘削、スーパーコンテナ、間隔ブロック及びプラグなどに関して）。
- 事前に製造されたプレファブ式の処分容器（スーパーコンテナ）が使用される。これにより、キャニスタに隣接する埋め戻し材の品質保証が容易になる。
- 建設及び操業時に岩体に生じる擾乱が低減する（定置坑道の発破が行われたいため）。
- 建設中の環境面での影響が低減する（掘削すべき岩盤量が減り、それに伴って使用する充填物質の量も低減するため）。
- 建設費用（補強に要するものを含む）が少なくなる。
- 埋め戻しに要する費用が少なくなる。

KBS-3Hの場合、より多くのプレファブ式の工業部品が使用され、定置プロセスにおける人間の関与が低減される。これは好ましいことであり、その結果として、寸法許容誤差が少なくなり、高い品質が得られるはずである。スーパーコンテナの組み立ては、制御された環境のもとで、工業プロセスとして行われる。これにより、キャニスタ、埋め戻し材及び緩衝材を別々に「手作業」で設置する場合よりも一貫性が高まるものと見込まれる。定置横坑の機械掘削（ドリル掘削）も、定置坑道の「手作業」による掘削よりも一貫性が高まる。しか

し、当然のことながら、KBS-3Vの定置孔にも機械掘削法が使用されることは指摘しておくべきであろう。

KBS-3Hの開発が進められているもう1つの理由は、それによってKBS-3方式が強化され、KBS-3Vにとっても利益となりうる新たな解決法や技術が生み出される可能性があるためである。

最終的に、KBS-3VとKBS-3Hを比較した上での決定は長期安全性と実現可能性の問題となる。KBS-3VからKBS-3Hへの変更が考慮されるのは、横置き定置方式が技術的に実現可能であり、KBS-3Vと同様に安全であることが明確に証明できた場合に限られる。変更がなされる理由としては、KBS-3Hの採用にによって経済的な利益が得られる可能性も挙げられる。



### 3 KBS-3H設計の開発（2001～2010年）

以下の部分で、2001～2010年のKBS-3Hプロジェクト・フェーズについて簡略に記述する。

#### 3.1 2001年

SKB社は2001年に横置き方式のKBS-3に関する「研究開発・実証プログラム」を提示した（SKB 2001b）。このプログラムはKBS-3H設計の開発の基礎としての役割を果たしており、以下のセクションにおいてその説明を行う。

基盤岩の利用度（すなわち、処分場の特定の容積内に何体のキャニスタを定置できるか）は調査すべき重要な事項だと見なされた。このため同プログラムでは、地下レイアウトの修正を行うべきだという提案が示されている。そしてこれも、予備的な安全評価の基礎の1つとされることになった。KBS-3HとKBS-3Vは同じ人工バリア・システムを使用するものであり、同様の地層環境を対象に設計されていることから、KBS-3Vの安全評価方法をKBS-3Hにも適用することができると判断された。以下に挙げる事項のモデル化など、いくつかのKBS-3H固有の問題が、予備的な安全評価でさらに注目する必要があるものとして特定されている。

- 廃棄物、キャニスタ、緩衝材及びスーパーコンテナ・シェルを含めたスーパーコンテナの変遷。
- スーパーコンテナ・シェルと腐食生成物との化学相互作用の起因するベントナイトの劣化。
- 飽和に伴う熱・水・力学面での変遷。
- 局所的な地下水流動に対するプラグの間隔ブロック（キャニスタを分離するベントナイト・ブロック）の効果。

緩衝材の厚さ、緩衝材の膨潤及び均一化、緩衝材の局所的な飽和、貫孔作用/浸食のリスク、スーパーコンテナの鋼鉄シェルとの接触による鉱物学的な効果、さらには閉鎖前の定置横坑への地下水の流入の効果など、緩衝材の挙動に関連する問題は高い優先順位を備えているものと見なされた。また水平横坑に関する地下水制御の方法を検証する必要性が確認されている。

いくつかの横坑の掘削手法が調査され、エスポ硬岩研究所（HRL）において、水平プッシュ・リーミング又はクラスタ・ドリルによる掘削のいずれかを用いて50 mの試験横坑を掘削することが提案された。これにより、もう1つの重要な問題である定置手法の試験も行うことができることになる。またスーパーコンテナの設計と定置装置の開発をさらに進め、実際の製造とこの試験横坑内での実証作業を行うことが提案された。

スーパーコンテナと間隔ブロックが収容された後の定置横坑は、横坑末端プラグでシーリングする必要がある。さまざまな横坑末端プラグ代替策を調査した上で、その中からエスポHRLでの設計、製造及び実証の対象として1つを選定すべきだという提案がなされた。

同プログラムで特定された最後の中心問題は「回収可能性」であり、緩衝材が水を吸収して変形した後、あるいは横坑にプラグが設置され、シーリングが施された後に、キャニスタ

を撤去する作業が取り扱われる。研究開発・実証プログラムにおいて技術的な仮定を設定し、キャニスタの健全性を損なわずに回収可能性を実現する効率的な方策を特定するべきだという提案が示された。

定置横坑の直径は予備的に1.75 mと仮定され、これはKBS-3Vの定置孔と同じ直径である。横坑の長さは200～500 mとすることができ、直線的で平行に配置され、かつ横坑入り口からわずかに上方に傾斜したものとされるべきである。

### 3.2 2002～2003年

KBS-3Hの開発は、「実現可能性研究フェーズ」をもって開始された。このフェーズは主として岩盤掘削手法、定置装置の取り扱い、スーパーコンテナの設計などの技術的な問題を取り扱うものであった。このプロジェクト・フェーズで得られた主な結論は、この設計は技術的に実現可能であり、長期安全性に関する要件を満たすというものであった。その成果はSKB社の『2004年研究開発・実証プログラム』（SKB 2004）にまとめられている。

2003年に「基本設計フェーズ」が立案された。このフェーズで検討対象となったのは、定置が円滑に進められるように厳格な寸法許容誤差が適用された、長さが最長で300 m、直径が1.85 mの直線的な横坑である。スーパーコンテナと間隔ブロックの設置は、水圧破碎法技術に基づく機械を使用することが計画された。

このプロジェクト・フェーズの主な目的は、同プログラムにおいて長期安全性の面から見て重要なポイントを明らかにすることにあつた。この作業は、技術開発、実証のための準備、そして設計の長期安全性に関する初期研究という3つの領域で構成されていた。

基本設計フェーズの結果は、文献 [Thorshager and Lindgren 2004] に報告されており、その内容は次のようになっている。

- KBS-3H設計に基づく処分場の建設及び操業に必要な装置の設計及び製造には良好な可能性が存在する。しかしこの設計の総合的な性能に関する結論を出し、最適化をさらに進められるのは、エスポHRLでの実証試験が完了した後のことになる。
- 操業期間中及び操業直後の緩衝材の挙動に関する研究により、緩衝材の機能に影響を及ぼす多くの要素が存在することが、また1つの単純だがロバストなシステムを設計することは困難であることが示されている。
- 緩衝材の初期の変遷と、ベントナイト緩衝材の飽和後のプロセスに関する情報は限定されており、追加情報が得られることにより設計の諸要件に影響が及ぶ可能性がある。

この段階で明らかにされた問題は、「実証フェーズ」（2004～2007年）の計画設定の基礎として役立った。

### 3.3 2004～2007年

2004～2007年に行われた「実証フェーズ」の計画は、2003年までの開発によって得られた理解と、KBS-3H設計の実現可能性を実証するために解決する必要があることが明らかになったさまざまな問題に基づいて設定された。すなわち、このプロジェクト・フェーズの総合的な目標は、横置き定置方式が技術的に実現可能であることと、レファレンス設計である

KBS-3Vと同じ長期安全要件が満たされることを実証する目的で、実用試験を行うことにあった。KBS-3Hに固有のさまざまな問題に焦点を合わせることが決定された。SKB社とポシヴァ社が、KBS-3Vの枠組みにおいて、あるいは積み替え施設での取り扱いなど通常の産業用途に存在するさまざまな手法の検討において、すでに実証を済ませている側面は、この中に含まれていない。

総合的な目標は、いくつかの補助的かつより詳細な目標に分割されている。その例として、高い精度を備えた水平横坑掘削手法の実証、重量のあるスーパーコンテナを横坑に定置する装置の開発、候補となる設計の開発とレイアウトの調整、さらにはオルキルトのサイトで得られたデータや人工バリア及び母岩の挙動に関する基本的な理解に基づくセーフティケースの作成などが挙げられる。

2004～2007年の中心的な問題は、バリア設計の開発であった。この作業は、諸要件と採用可能な設計代替策とを設定するために、安全評価担当者の密接な協力を得て実施された。重要な要件の例として、幾何学的なばらつきや定置横坑への地下水の許容可能な流入量などの面での定置横坑に関する要件などが挙げられる。レイアウトの修正、バリア設計の開発、地下水管理システムに関する作業は、毎年『設計記述報告書』において報告されている。文献 [Autio et al. 2008] がその最新版である。

このプロジェクト・フェーズで集中的に研究されたKBS-3Hの中心的な要素はスーパーコンテナであった。効率的な水平定置を実現するためには、キャニスタと緩衝材を1つのユニット（スーパーコンテナ）として組み立てた上で定置横坑に搬入する必要がある。

このプロジェクトは、BD（基本設計）フェーズで行われた作業を継続するものであり、隔離の側面に含まれている熱に関する寸法設計により、それぞれのスーパーコンテナが次のスーパーコンテナ区画から水理学的に隔離されるという考えが採用されている。これは主として、設置作業中とその後の飽和プロセスにおいて区間と区間との間の水流を防止するよう設計された間隔ブロックを採用することで達成される。しかし、いくつかの研究が実施された後で、この設計のロバスト性を疑問視する意見が示された。このため、飽和プロセスの管理を向上させるために、新たな設計である「排水・人工注水・排気」(DAWE)が提案された。このDAWE設計では、定置フェーズ中は横坑に流入する地下水の排水が行われ、コンパートメント・プラグが設置された後で、プラグを通じた管を用いて水がコンパートメントにポンプで運び込まれる。これにより、水は横坑壁とシーリングされたコンパートメントの内側の緩衝材との間の空間を満たし、間隔ブロックとそれぞれのスーパーコンテナ内の緩衝材の膨潤が加速されることになる。連結された間隙空間が同時に静水圧下の水で満たされるため、スーパーコンテナ又は間隔ブロックの力学的な変位を招く有意な圧力勾配は存在しないことになる。排気及び人工注水に必要な管は、横坑の閉鎖前に、コンパートメント・プラグを通じて撤去される。概略的に見ると、固定リングを除けばDAWEはBDとほぼ同じである（鋼鉄リングは緩衝材の変位リスクを低減するために設置される）。

2007年半ばに、1つの追加設計として「STC」が提案された。予備的なSTC設計案では、それぞれのスーパーコンテナ区画は間隔ブロックでシーリングされ、1つのスーパーコンテナ区画が流入水で満たされる前に、一時的にそこから次のスーパーコンテナ区画に水が流

れ込まないようにするシーリング・リングが設置される。その区画が水で満たされた後、水は次の区画に流れ込む。

安全評価作業は2005年に開始された。BDはこの当時KBS-3Hのレファレンス設計と見なされており、その時点まで、BDとDAWEとの間に長期安全性の面での大きな相違は特定されていなかった。これらの設計案の違いは主として、何からの放射性核種の放出が起きる前の初期変遷フェーズに影響を及ぼすものであると判断されていた。いずれのオプションが実施された場合でも、処分場の最終的な飽和状態は基本的には同じである。これを受けて安全評価作業の対象としてBDが選択されることになった。

安全評価への入力事項は、『2007年設計記述』(Autio et al. 2007) の付属書Cに概述されている。この当時に使用されたサイト・データは『2005年オルキルオト・サイト記述』(Posiva 2005) に基づくものであったが、その後更新されて、可能な場合には全て『2006年オルキルオト・サイト記述』(Andersson et al. 2007) からのデータが組み込まれた。BD案は『2007年設計記述報告書』(Autio et al. 2008) において記載されている。この安全評価の焦点は、KBS-3H処分場に関して、KBS-3V処分場と異なっている側面に、あるいは異なる意味を持つ可能性のある側面に合わせられた。

2004～2007年のプロジェクトの重要な側面の1つとして技術の実証が挙げられ、この種の活動の多くはエスポHRLの現実的な環境で行われた。2本の実規模水平横坑(長さは95 m及び15 m)が掘削され、46トンの模擬スーパーコンテナの定置を行うプロトタイプ装置が開発され、試験は成功裡に終了した。またこの2本の横坑は、横坑末端プラグの設置手法や、定置横坑への地下水流入量を低減させる手法を試験するためにも使用された。

全体として、2004～2007年にはKBS-3Hプロジェクトにおいて多くの成果が達成された。しかしこのプロジェクト・フェーズに、いくつかの大きな不確実性が見いだされた。そのうちの一部はKBS-3Vと共通するものである。1例として、操業期間中とその後の緩衝材の飽和期における緩衝材の挙動が挙げられる。この場合、水流の流入量がきわめて少ない場合でもベントナイトの貫孔作用や浸食のリスクが生じる可能性があり、1体のスーパーコンテナ区画(～10 m)に見積もられた限度は0.1 l/分とされた(Autio et al. 2007)。また安全評価に基づいてKBS-3H固有の問題が特定されている。その多くは、スーパーコンテナの鋼鉄シェルや横坑内に存在する他の鋼鉄製構造材料が及ぼす影響と結びつくものである。

こうして見いだされた不確実性に加え、いくつかの構成要素に関する実証を、このプロジェクト・フェーズの後に行う必要が残っていた。その例として、間隔ブロックや充填ブロックの製造及び設置、コンパートメント・プラグの建造及び設置などが挙げられる。

### 3.4 2008～2010年

「実証プロジェクト」フェーズの後に、プロジェクト・フェーズ「横置き定置KBS-3Hの補完的研究」(2008～2010年)が続いた。ここには、重要な設計と物質の選定、そして「システム設計」フェーズ(SK B 2012)のための計画が含まれる。

初期の活動で開発された主なKBS-3H設計策、すなわちDAWE(排水・人工注水・排気)及びSTC(準気密コンパートメント)(Autio et al. 2007)のさらなる開発と評価によって、

しっかりした基礎のある**KBS-3H**レファレンス設計として**DAWE**が選定されることになった。

長期安全性の面では、ベントナイトと金属の相互作用に焦点が合わされ、研究により、スーパーコンテナ、プラグ及びその他の支持構造物の材料の選定に関する良好な根拠が示され、チタンが選定されることになった。このプロジェクト・フェーズで行われた選定及び評価は、次のプロジェクト・フェーズにフォルスマルクとオルキルオトを対象として計画されている安全評価で使用されることになる。

**KBS-3H**固有の生産ラインの概要が設定され、フォルスマルクとオルキルオトの両方に合わせたレイアウトの修正が行われた。システム構成要素の実規模試験も行われ、良好な結果が得られている。実規模コンパートメント・プラグ試験では、横坑コンパートメントを水理学的に分離するプラグの設置が可能であることが示された。

## 4 KBS-3Hシステムの設計（2011～2017年）

### 4.1 システム設計フェーズの目標及び範囲

「システム設計フェーズ」の目標は、KBS-3Hのシステム設計レベルの開発を進めることと、長期的な安全活動に関するレファレンス・サイトとして採用されたオルキルオトを対象とする長期安全性評価を行うことにあった。

この目標は、構成要素やサブシステムの場合、設計基準と要件を評価することにより、またこれに基づいてSKB社の「技術開発プロセス」に従ってシステム設計レベルに到達することにより、達成される予定であった（図4-1及びこの図に示した「システム設計フェーズ」の説明を参照）。

「システム設計フェーズ」に関して設定された要件を履行するための構成要素とサブシステムに関する目標は、次のとおりであった。

- サブシステム又は構成要素の設計が設定されている要件を検証可能な形で満たす用にする。
- サブシステム又は構成要素に関して、製造、管理及び保守計画に関するいくつかの提案が存在する要にする。

システム設計フェーズにおける第1の基本的な目標は、設計基準を更新した上で、安全評価と操業安全性の面からそのチェックを行うことにあった。その後、システム設計は次に示すステップを経て行われることになっていた。

- 更新された設計基準に合わせて、設計ソリューションのための設計要件/仕様の見直しを行う。
- 改定された設計要件/仕様に基づき、概念フェーズで選定された概念設計の開発又は更新を行う（多くの場合、以前のKBS-3Hプロジェクト・フェーズで実現された設計）。このステップには、開発された/更新された設計が最終的に設計要件及び仕様を満たしていることをダブルチェックする作業も含まれる。
- 産業化及び実現のための予備計画を設定する。この中には、設計要件及び仕様を満たされるようにするためにサブシステム又は構成要素を実現し、管理する方法を示す管理プログラムが含まれる。

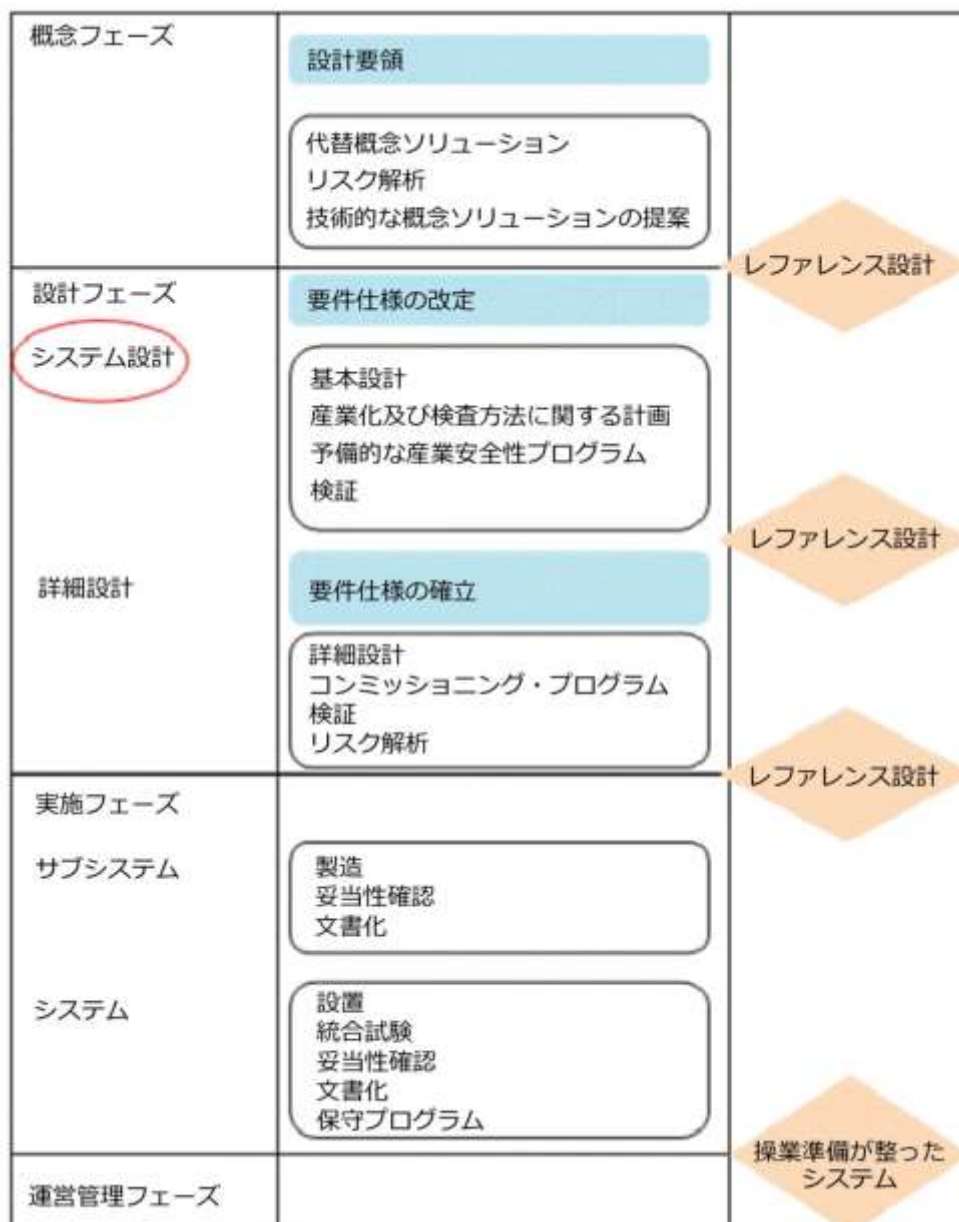


図4-1. SKB社の実現モデル。システムが操業準備の整った状態に至るまでのさまざまなフェーズの順序を示す。本報告書で取り扱っているのは、この図において丸で囲んだKBS-3Hプロジェクトに関するシステム設計フェーズ（2011～2017年）である。

- 以下に関する検証を行う。
  - a) 設計策が設計要件及び仕様を満たしていること。
  - b) 製品を要件及び仕様を満たされる方法によって製造できること（管理プログラム）。
- 管理プログラムを用いた産業化及び実現に関する設計と計画の両面において、技術的なリスクの評価を実行する。
- 顧客に対し、詳細設計フェーズに進むための決定を行うための基礎を提供する。



## 4.2 さまざまな構成要素の設計及び要件

現行KBS-3Hレファレンス設計は、DAWE（排水・人工注水・排気）と呼ばれている。この設計は、基本的に、以前のプロジェクト・フェーズで開発されたものとほぼ同じものである（文献 [SKB 2012] 及び [Posiva 2012c] を参照）。本章では、このKBS-3Hレファレンス設計について簡単に、「システム設計」フェーズで行われたさまざまな開発を重視した形で説明する。

### 4.2.1 横坑の概略的な説明

KBS-3Hの場合、使用済燃料キャニスタは、最長で300 mの定置横坑内に水平方向に（横置きに）定置される（図4-2）。KBS-3Hバリエントでは、KBS-3V設計の場合とは異なり、プレファブ式の設置用パッケージが使用される。これはスーパーコンテナと呼ばれ、処分に先立ってキャニスタ積替施設の産業プロセスとして組み立てられるため、定置作業時にミスが生じるリスクが低減される。このスーパーコンテナは、穿孔を伴う金属製シェルとその内部に収納された

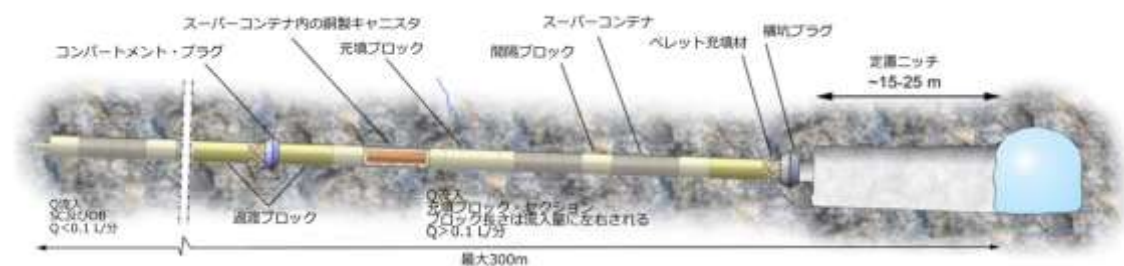


図4-2. KBS-3H横坑の概略図。

ベントナイト緩衝材は、スーパーコンテナの間に置かれる間隔ブロックにも使用される。使用済核燃料とキャニスタはKBS-3HとKBS-3Vの両方に共通するものであり、本報告書では詳細は説明しない。この点についてはたとえば、文献 [SKB 2010b, 2010c] や [Raiko et al. 2012]などを参照のこと。

横坑には横坑プラグが含まれ、横坑の長さが150 mを超えた場合にはコンパートメント・プラグも含まれる（セクション4.5）。

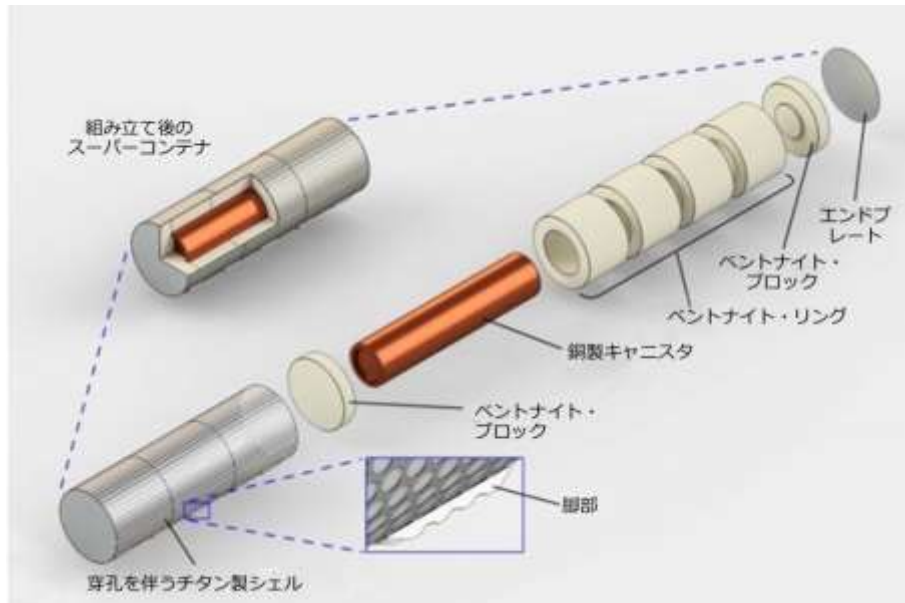


図4-3. KBS-3Hスーパーコンテナ。

プラグに隣接した部分に、そして存在する場合には透水性の横坑区画に、充填構成要素が使用される（セクション4.4を参照）。前回のプロジェクト・フェーズである「補完的研究」（SKB 2012）以降の更新事項として、このプロジェクト・フェーズの設計では、透水性亀裂を隔離するために計画されていた、中間に充填物質を挟んだ2つのコンパートメント・プラグ（SKB 2012）（セクション3.3.6）を含む構造物が排除されていることが挙げられる。充填ブロックは、横坑の透水量係数が最大の区画にも使用されるものと仮定されている。

「スーパーコンテナ区画」という用語は、1体のスーパーコンテナと間隔ブロックを半分にしたものが2個（すなわちスーパーコンテナの両側に半分ずつ）を含む横坑の1区画のことを意味する。したがってスーパーコンテナ区画の長さはキャニスタの中心から中心までの最小間隔と同一である。表3-1に、キャニスタ、スーパーコンテナ、間隔ブロック及びスーパーコンテナ区画の長さを、キャニスタ・タイプ別に示した。ポシヴァ社の処分場では3つのキャニスタ・タイプが、SKB社の処分場では1つのキャニスタ・タイプが使用されることになっている。

表4-1. キャニスタ・タイプ別のキャニスタ、スーパーコンテナ、間隔ブロック及びスーパーコンテナ区画の長さ。

パラメータ/ キャニスタ・タイプ	ポシヴァ社 BWR (OL1-2)	ポシヴァ社 VVER-40 (LO1-2)	ポシヴァ社 PWR (EPR)(OL3-4)	SKB社 PWR、 BWR
キャニスタの長さ (mm)	4,752	3,552	5,223	4,835
スーパーコンテナの長さ (mm)	5,387	4,187	5,859	5,395
間隔ブロックの長さ (mm)	3,613	3,013	4,741	3,205
スーパーコンテナ区画の長さ (mm)	9,000	7,200	10,600	8,600 *)

\*) この値は、SKB社のレイアウト調整（2012年）で用いられた横坑間隔が30 mの場合のスーパーコンテナ区画の長さ（キャニスタの間隔に等しい）である。

定置横坑は断面が円形で、長く、ほぼ水平な孔であり、このプロジェクト・フェーズで想定された次に示す仕様を備えている（出典は文献 [Posiva 2016a] の表A-21と文献 [SKB 2012] の表3-3であり、後者に関しては若干の修正を加えた）。

- 直径：1,850～1,855 mm
- 最小限の長さ：300 m
- 傾斜角：2°±1°
- 直線に関する許容誤差（中心線からのうねり又は逸脱）：長さが6,000 mmを超える場合で±10 mm（鉛直方向）、長さが6,000 mmを超える場合で±20 mm（水平方向）（Posiva 2016g）。
- 横坑壁の粗度/段差に関する許容誤差：±0+5 mm（すなわち横坑の直径：1,850+5 mm）。

#### 4.2.2 地下水の制御

定置作業中のコンパートメントの排水は、横坑の上向きの傾斜によって実現される。コンパートメント・プラグ又は横坑プラグが設置されるまで、水は自己排水によって横坑床沿いに横坑の外に出る（文献 [SKB 2012] のセクション4.3.1）。設置フェーズの後半には、プラグのカラー部分に排水口が設置される。人工給水が開始されると、この排水口は閉鎖される。

横坑パイロット孔の事前グラウチングを、透水性亀裂のシーリングに使用することができる。横坑のリーミング（拡孔）時にも、必要に応じてプレグラウチングが実施される予定である。詳細については文献 [SKB 2012] のセクション9.3.3を参照のこと。

プレグラウチングによる地下水制御は、特に横坑輪郭の外部にグラウチング孔を開けることはできないことから、KBS-3H定置横坑において必ずしも常に十分に効果的であるとは

限らない（文献 [Posiva 2016a] の表A-21）。このため、効率的なポストグラウチング方法が必要とされる。KBS-3Hのために、実際の処分場深度における条件の処理が可能な「メガ・パッカー」と呼ばれるポストグラウチング装置が開発された。このメガ・パッカーは大型の鋼鉄管の両端にパッカーが備わっているものであり、その詳細については文献 [SKB 2012] のセクション4.9及び文献 [Eriksson & Lindström 2008] を参照のこと。

ポストグラウチング後の最大許容流入量は1つの横坑で10 L/分である（文献 [[Posiva 2016a] の表A-21）。定置装置のスライディング・プレートとパレットが改造されれば、横坑への許容流入量を引き上げることができよう。プラグのカラー部分を貫通する排水口が閉鎖された時点で、排水は終了する。

#### 4.2.3 人工注水と排気

レファレンス設計であるDAWEの場合、定置横坑壁とスーパーコンテナ、間隔ブロックとシーリングされたコンパートメント内の充填構成要素の間の何もない環状空間には、人為的に水が満たされる。これにより、緩衝材と充填構成要素の初期膨潤、横坑表面に対する対圧の発達、キャニスタの所定の位置の確保、そして軸変位や過剰な緩衝材浸食の防止が確実に実現することになる（文献 [SKB 2012] のセクション4.3.4）。

給水は、短い湿潤化用の管を通じてプラグの向こう側に水をポンプで送り込む方法によって行われる（水の塩分濃度はまだ決定されていない）。3本の短い給水管は、過渡ブロックの下にあるパレットが満たされた区画の後方にまで伸びている。給水期間中、空気は圧縮され、わずかに上向きの傾斜を伴う横坑コンパートメントの末端部分に蓄積される。完全な注水を行えるよう、ここに集まった空気は、長い管を通じてコンパートメントから排出される。コンパートメントの末端部分では、排気管が短い底部管を用いて横坑の最も高い部分まで伸ばされる（文献 [SKB 2012] のセクション4.3.4）。この底部管は最終的に横坑内部に残される予定となっている（文献 [SKB 2012] のセクション9.9）。

短い給水管を使用することで、使用後に撤去しなければならないのは1本の長い管（排気管）のみとなるため、管撤去プロセスが著しく加速される。人工湿潤化管と排気管の撤去は、DAWE設計においてきわめて重要なものである。不必要な異物の残留を回避するために、管を横坑内に残すことはできない。短い湿潤化管と長い排気管の両方とも、実現可能な時間フレーム（湿潤化開始から1日以内）で撤去することができる（文献 [SKB 2012] のセクション6.3.2）。

前のプロジェクト・フェーズでは、人工注水に水道水が使用されることが想定されていた（文献 [SKB 2012] のセクション6.1.2）。しかし現行プロジェクト・フェーズでは、水道水とオルキルトにおける処分場深度に現在存在している地下水の模擬水（すなわち、TDS含有量が10 g/Lで、Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>質量比が1:2のもの）の2つの代替水組成が検討されている。

#### 4.3 緩衝材の設計

スーパーコンテナ内の緩衝材構成要素は、リング状ブロックと両端に設置される固形ブロックで構成される。KBS-3Hの場合、「緩衝材」という用語の意味には、複数のスーパー

コンテナの間に設置される「間隔ブロック」も含まれる。KBS-3Vの場合の同様な緩衝機能を実現するためには、スーパーコンテナ内の緩衝材と間隔ブロックの緩衝材の両方が必要となるが、それぞれの寸法、乾燥密度及び処置含水率はわずかに異なっている。間隔ブロックとスーパーコンテナ内の緩衝材の寸法は、キャニスタのタイプ、レイアウト、母岩及び横坑構成要素の熱伝導率と熱容量によって決定される。間隔ブロックは脚部の上に立つことになっている（文献 [SKB 2012] のセクション4.5）。表4-2に、緩衝材の設計要件を示した。

表4-2にスーパーコンテナ内に収容されるベントナイト緩衝材ブロックのレファレンス設計を、また表4-3に間隔ブロックのレファレンス設計を示した。操業中に湿気によって割れが生じるのを防止するために、間隔ブロックの含水率はスーパーコンテナ緩衝材ブロックよりも高く設定される（文献 [Posiva 2012c] のセクション4.2.2及び [Börgesson et al. 2016] を参照）。

**表4-2. スーパーコンテナ内のレファレンス緩衝材ブロック（文献 [Posiva 2016d] の表3-3、表3-4及び表3-15）。**

設計パラメータ	公称設計	許容範囲内のばらつき
スーパーコンテナ内の固形ブロック		
乾燥密度	1,753 kg/m <sup>3</sup>	± 20 kg/m <sup>3</sup>
含水率	17%	± 1%
寸法	長さ：350 mm 外径：1,740 mm 内径（頂部ブロック）：798 mm 内径（底部ブロック、くぼみを伴う底部）：828 mm 内径（底部ブロック、平らな底部）：－	± 1 mm + 1/－2 mm + 0/－2 mm + 0/－2 mm
スーパーコンテナ内のリング状ブロック		
乾燥密度	1,885 kg/m <sup>3</sup>	± 20 kg/m <sup>3</sup>
含水率	11%	± 1%
寸法	長さ：890～1,308 mm 外径：1,740 mm 内径：1,058 mm	± 1 mm + 1/－2 mm + 1/－2 mm

表4-3. スーパーコンテナ外部のレファレンス緩衝材ブロック（間隔ブロック）（文献 [Posiva 2016d] の表3-5及び3-15）

設計パラメータ	公称設計	許容範囲内のばらつき
スーパーコンテナ外部の固形ブロック（間隔ブロック）		
乾燥密度	1,712 kg/m <sup>3</sup>	±20 kg/m <sup>3</sup>
含水率	21%	±1%
寸法	高さ：500 mm 外径：1,765 mm	±1 mm

KBS-3Hシステムの設計フェーズでは、組み立て施設内の空気の相対湿度を2つの異なる含水率に合わせて最適化することができないため、スーパーコンテナ・ブロック（固形ブロック及びリング）内で統一された含水率を設定することが望ましいことが認識されている。固形ブロックで17%、リングで11%であれば、異なるRHレベルとの平衡が成立する。現在使用されている緩衝材の材料（MX-80）及びプレス機を用いた設計を変更することにより、必要な密度を維持した上でリング状ブロックと固形ブロックの両方の含水率を約14%にすることも可能である。スーパーコンテナの加熱試験を行うために、14%の実規模固形ブロック及びリング状ブロックが製造されている（セクション4.8.7を参照）。

#### 4.4 充填構成要素の設計

KBS-3H設計では、充填構成要素はスーパーコンテナを定置できない横坑区画内で使用される。以下に示すように、合計で6つのタイプの充填構成要素が存在している（図4-4）。

1. 横坑プラグに隣接する充填物（コンパートメント側）。この中には過渡ブロック（図4-4の緑色部分）とペレット充填物（ピンク色部分）が含まれる。両者を合わせて過渡領域と呼ぶ。
2. 流入位置の充填物（充填ブロックと呼ばれる。図4-4の水色部分）。
3. コンパートメント・プラグの入り口側の充填物（図4-4の緑色が過渡ブロックを、ピンク色がペレットを示す）。両者を併せて過渡領域と呼ぶ。
4. コンパートメント・プラグの横坑末端側の充填物（図4-4の緑色が過渡ブロックを、ピンク色がペレットを示す）。両者を併せて過渡領域と呼ぶ。
5. 横坑末端部の充填物。
6. 横坑末端部のパイロット孔スタンプの充填物。

充填物と過渡ブロックに関する諸要件は、間隔ブロック（表4-3）に関するものと同じである。

充填ブロック（上記のリストの#2）は、横坑区画のうち、地下水の初期流入量が比較的大きいため、スーパーコンテナ及び間隔ブロックの設置に適さない区画に使用される。

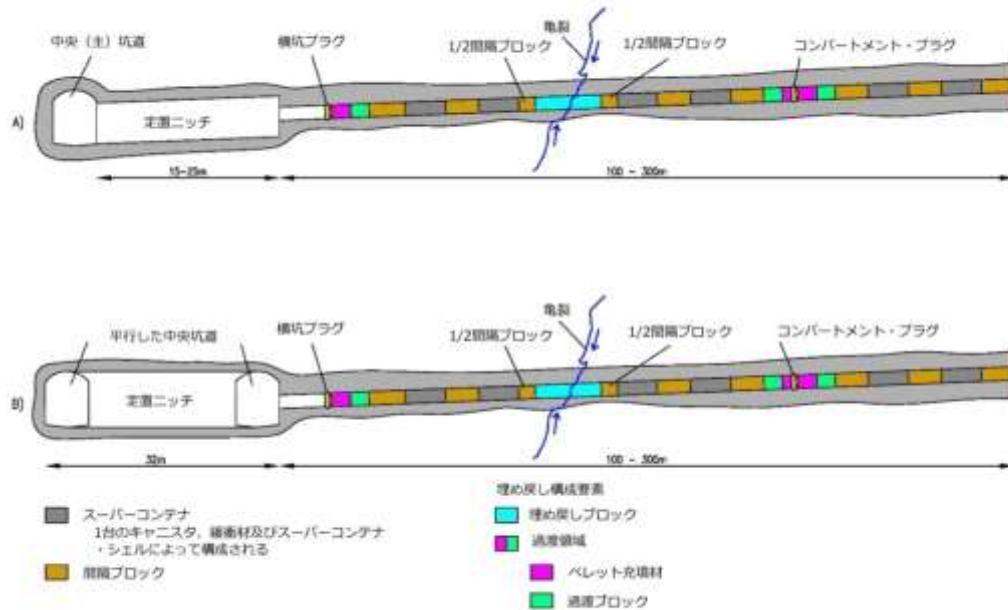


図4-4. 定置横坑とその主要な構成要素。定置横坑は、設置時の排水が可能となるよう、ニッチからわずかに上向きの傾斜を付けて掘削される（出典：文献 [Posiva 2013]）。A) 1本つの中央（主）坑道のみを備えたSKB社の処分施設設計。B) 2本の平行した中央坑道を備えたポシヴァ社の設計。

設置作業面での理由から、プラグを間隔ブロックから分離するために、コンパートメント・プラグの両側（#3及び#4）に過渡領域を設定する必要がある。図4-5に、過渡領域の寸法を示した。コンパートメント・プラグのシーリングされた側に過渡領域を置く目的は、プラグの隣接する空の横坑区画（隣接する間隔ブロックの性能を支援する方法でプラグを設置する上で必要とされる）の充填を行うことにある。コンパートメント・プラグの横坑入り口側に過渡領域を置く目的は、隣接する横坑構成要素の性能を支援する埋め戻し物質として機能させることにある。過渡領域（#1、コンパートメント・プラグのシーリングされた側に設置されたものとほぼ同じ）が、横坑プラグとそれに隣接する間隔ブロックとの間に設置されることになる。



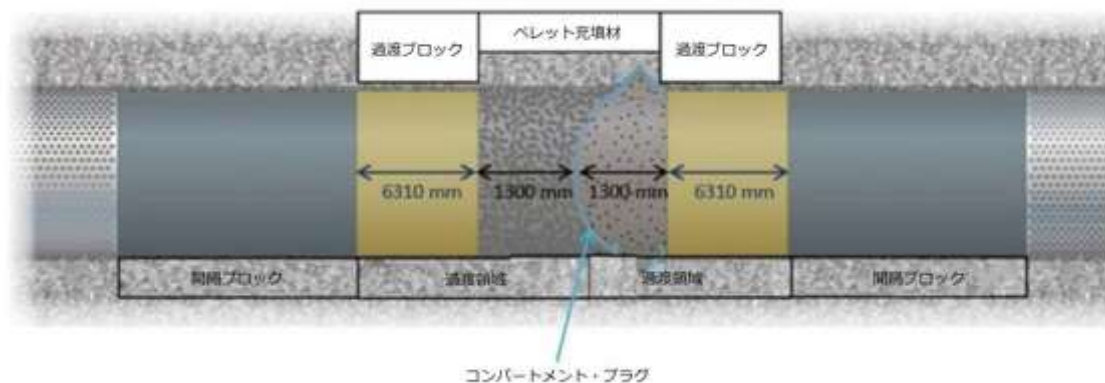


図4-5. コンパートメント・プラグに隣接する充填構成要素の概略図。横坑プラグに隣接する過渡領域には、コンパートメント・プラグのシーリング側の過渡領域（左側）と同じ設計及び寸法が使用されている（文献 [Posiva 2016d] の図3-16）。この図の縮尺は正確なものではない。

充填構成要素は、緩衝材とほぼ同じ組成の粘土物質で製造される予定である。充填構成要素の概念設計は、ペレットと間隔ブロックとほぼ同じ円筒形ブロックの利用に基づくものである。充填構成要素の寸法は文献 [Posiva 2016d] に示されている。特に、充填ブロックの長さは、透水性亀裂の流入速度と方向に依存する（文献 [Posiva 2016d] のセクション 3.4.2）。

1つの充填構成要素（上記のリストの#5）が、横坑切羽とそれに隣接する間隔ブロックの間のKBS-3H定置横坑末端部に定置される（文献 [Posiva 2016d] のセクション3.4.4）。緩衝材と充填構成要素の密度の低下につながりうる開いた空洞が生じないようにするため、横坑末端部より先の残存するパイロット孔は充填される（#6）。もう1つの目標は、横坑システムと母岩との間に地下水流が生じる可能性を排除するために、パイロット孔のシーリングを行うことにある（文献 [Posiva 2016d] のセクション3.4.5）。

#### 4.5 コンパートメント及び横坑プラグの設計

KBS-3Hのコンパートメント・プラグは、横坑のさまざまな区画（最大で～150 m）を水理的に分離し、シーリングするために使用する。またこれにより、DAWEの人工注水手順の実施が可能となる。このプラグ（図4-6）は、3種類のチタン構成要素（締め付けリング、締め付けリングに付属するカラー、キャップ）、さらには1つのセメント系構成要素（事前に準備された岩盤におけるV字型の切り込みに設置される締め付けリングの打設に使用される低pHコンクリート打設物）で構成される。カラーは溶接によって締め付けリングに留められ、キャップが同様にカラーに留められる。図4-6に、プラグの全体的な原理を示した。

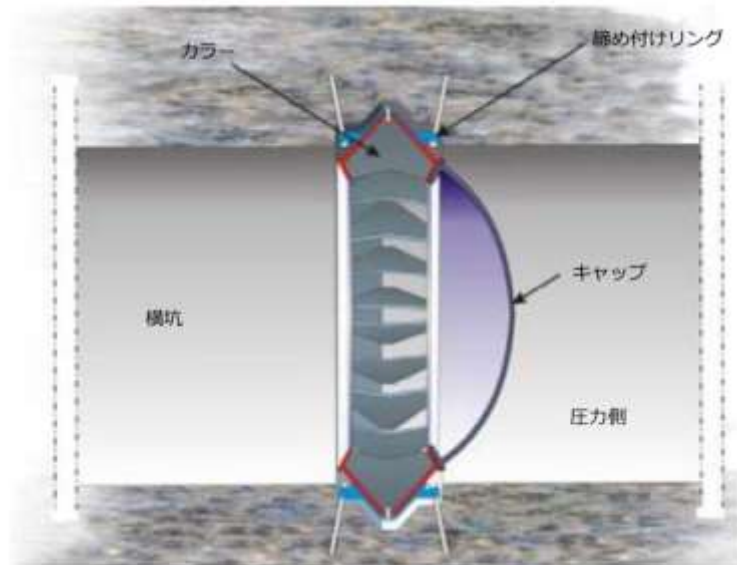


図4-6. コンパートメント・プラグの断面図。横坑プラグのレファレンス設計は、コンパートメント・プラグの場合とほぼ同じである（文献 [Posiva 2016e] のセクション3-1）。

横坑入り口は横坑プラグによってシーリングされる。横坑プラグはコンパートメント・プラグ（前述したもの：図4-6に示されている）ときわめて似通ったものである。

横坑プラグの機能はKBS-3Vの定置坑道プラグとほぼ同じであり、横坑から出た有意な水の流動がプラグ自体を通じて、あるいは隣接する岩盤を通じて発生し、緩衝材において貫孔作用や浸食を生じさせる可能性を排除する上で役立つ（文献 [SKB 2012] のセクション4.8.1）。またこの横坑プラグにより、DAWEの給水手順の実施が可能となる（文献 [Posiva 2016e] のセクション3.1）。

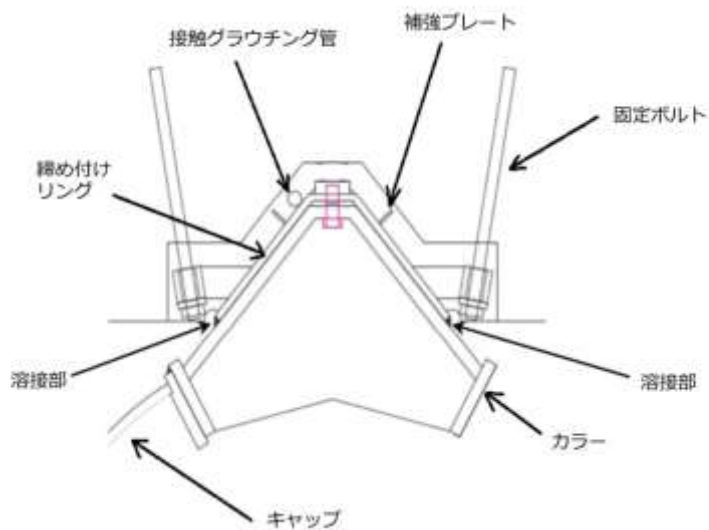
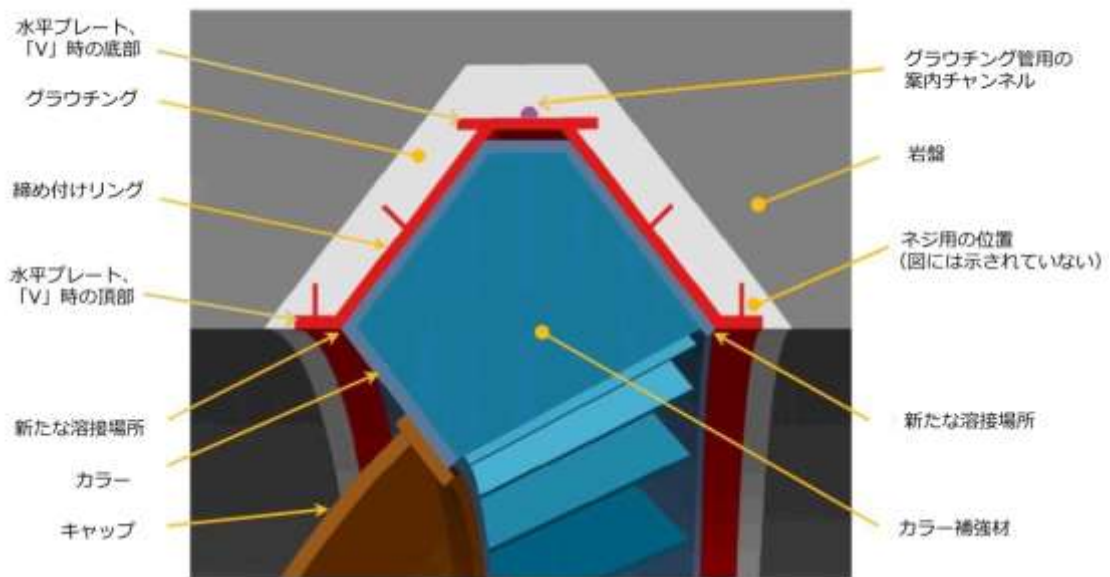


図4-7. 上図：アクセス及び点検が容易で、グラウチング管との接続用の一体型チャンネルを伴う、溶接部を伴う新たな設計。この新設計には補強プレートも追加されている。下図：古い設計。

プラグの現行レファレンス設計は、KBS-3H横坑の水理学的に分離されたコンパートメントへの分割が可能かどうかを検証する目的で2009～2010年に開発されたコンパートメント・プラグのプロトタイプに由来するものである。エスポでのプロトタイプの試験は成功し（材料には鋼鉄が使用されている）、当該設計があらかじめ設定された試験規準を満たすことが示された（文献 [Posiva 2016e] のセクション3.1）。設計の修正が提案されているものの（文献 [Posiva 2016e] のセクション3.2）、それらが実行に移されるかどうかは将来のプロジェクト・フェーズで決定されることになる。提案された主な修正点として、溶接をしやすくすることにより一体型のグラウチング管を可能にする再設計が挙げられる（図4-7を参照）。

長期的な性能面での検討に基づいて、プラグ材料としてチタンが選定されている。プラグに使用されるのは、等級3又は等級12（ASTM）のチタンである。この等級3及び等級12のチタンはほぼ同じ力学特性を備えており、入手しやすさに応じてそのいずれかを選択することができる（文献 [Posiva 2016e] のセクション3.3）。

## 4.6 スーパーコンテナ・シェルとその他の2次的構成要素の設計

### 4.6.1 スーパーコンテナ・シェル

KBS-3H代替策では、ベントナイト緩衝材に取り囲まれたキャニスタが、プレファブ式のパッケージ（スーパーコンテナ）に収納された上で、定置横坑内に定置される。このスーパーコンテナは、現行レファレンス設計（SKB 2012）によればチタン製の外部金属製シェル（図xx3）によって保持され、将来、チタンではない材料が採用される可能性もある。鉄-ベントナイト相互作用が受け入れ可能なものと立証された場合、鉄の方が費用面から望ましいと判断される。あるいはTi-Cuとのガルバニック作用の問題が存在する場合、ベントナイトが浸食を受け、金属と接触する可能性がある。いずれの問題にも将来の研究を通じて対処する必要がある。スーパーコンテナ内のベントナイトが水を吸って膨潤し、それに伴ってスーパーコンテナと横坑との間の空隙空間が満たされるように、スーパーコンテナ・シェルには穿孔が設けられている。また横坑の床よりも上に位置するように、スーパーコンテナ・シェルには金属製の脚部が付けられる予定である。

シェルとエンドプレートの肉厚は6 mm（チタンの場合）であり、外直径は1,761 mmである。シェルの円筒部分には穿孔が設けられている（穿孔度は61～62%、孔の直径は10 cm）であるが、エンドプレートには穿孔はない（文献 [Posiva 2016f] のセクション3-4）

### 4.6.2 スプレーシールドとドリップシールド

スプレーシールド又はドリップシールドは、薄いチタン製のシートであり、物理的浸食に対して緩衝材を防護するため、漏出水が自由に横坑壁から床へと流れ落ちるようにするために、母岩から水が噴出する場所や滴下する位置に配置される（文献 [SKB 2012] のセクション4.3.1）。シートは岩盤表面に密接に沿う形状のものとされる（文献 [Autio et al. 2008] のセクション4.2.2を参照）。横坑壁から岩盤の断片が崩落する（いわゆるアウトブレイク）場所には、ドリップシールド・タイプのチタン・プレートを利用することもできる。こうし

てできた孔はベントナイトで満たされ、チタン・プレートで覆われる。しかしスプレーシートとドリップシートが横坑構成要素の設置の妨げとなってはならない。

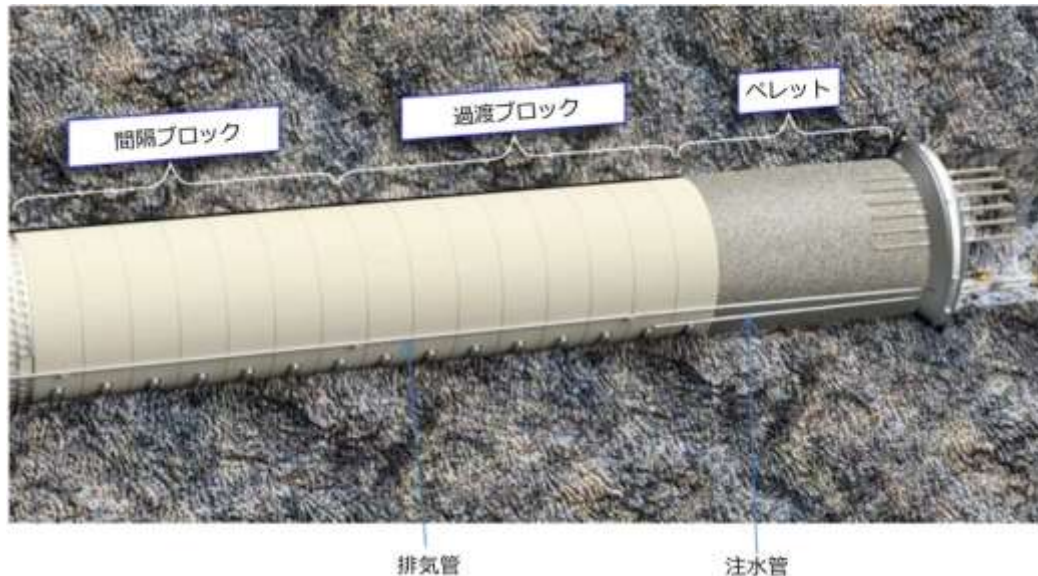


図4-8. 給水管と排気管：コンパートメント・プラグを通る短い管を用いた給水システムの主構成要素（横坑プラグと同様の設計）。3本の短い給水管が、水をペレットが充填された区画の向こう側の過渡ブロックの下の位置まで導く。

#### 4.6.3 人工注水と排気構成要素

DAWEによる人工給水は、コンパートメント又は横坑プラグの向こう側へと、給水管を用いて水をポンプで流すことによって実施される。給水管は、横坑内に約2 m伸ばされており、過渡ブロックの下のペレットが充填された区画の裏にまで伸びている（図4-8を参照）。給水期間中に、空気が圧縮され、横坑がわずかに上向きに傾斜していることから、横坑コンパートメントの末端部に蓄積される。こうした集まった空気は、最長150 mの管を通じて排出される。コンパートメント末端部では、完全な給水を保証するために、排気管は短い底部管を用いて横坑の最も高いポイントまで伸びている。給水が完了した後、当該管はコンパートメントから引き抜かれ、撤去される。

#### 4.6.4 パーキング用脚部

間隔ブロック、充填ブロック及び過渡ブロックは、脚部（50 mm）によって自立するようになっている（文献 [SKB 2012] のセクション4.4.1及び4.5.1）。現時点でこの脚部はチタンを用いて製造される予定である。この種の脚部によって、設置時にブロックがベントナイトと直接接触することなく、岩盤から流れ込む水が横坑床を自由に流動することができる。また設置作業面でも脚部は必要である。



#### 4.7 設置手法

KBS-3H定置装置は、横坑内で段階的な動作を行うことによりスーパーコンテナの持ち上げ及び運搬を行う、ウォーター・クッション手法に基づくプロトタイプ機である。スーパーコンテナが横坑内の行き先に到達するまで、持ち上げと押し出しのシーケンスが反復される。この定置装置は、リフト・パレットとスライディング・プレートと併せて1つの完全なユニットを構成するものである(図4-9)。リフト・パレットとスライディング・プレートが順番に動くことにより、段階的な動作が実現される。定置装置の本体は、この定置装置本体に直接取り付けられているスライディング・プレートを動かす一方で、車輪で移動する。放射線遮へいに接続されているリフト・パレットは、定置装置の静止時に定置装置本体と放射線遮へいとの間に位置する線形アクチュエータを用いて動かされる。

リフト・パレットは、スライディング・プレートの両側に設置され、装置全体を横坑軸に対して所定の位置に保つ「誘導プロファイル」によってスライディング・プレート上を誘導される。持ち上げられたスーパーコンテナのバランスは、定置装置本体の重量と釣り合いおもりバラスト(側面で調整することができる)によって保たれる。このバランスを取る力は、定置装置本体と遮へい物との間のライナー・アクチュエータにかかるねじり力としてリフト・パレットに伝えられる。車輪を制御することによって定置装置本体は横坑の中央に維持される。車軸は相互に連結されており、球面軸受けに載る形で定置装置本体に取り付けられており、このため車軸を回転させることにより本体のアクティブ・ステアリングが可能となっている。操縦は、それぞれの側の車輪異なる速度で駆動させ、相互連結された車軸の定置装置本体に対する角度を調整することによって可能になる。

定置装置は、使用されていない時には、定置横坑の外にある「始動用チューブ」に待機する。

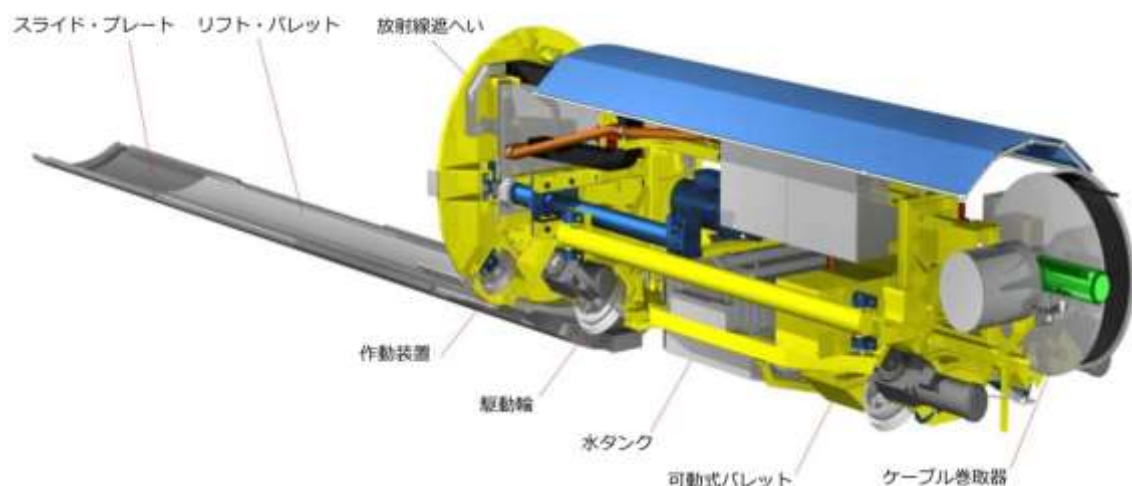


図4-9. 横置き定置装置の主な運転部分。

始動用チューブと横坑の間には、運搬用チューブのためのスペースが用意されている。これを用いてスーパーコンテナと間隔ブロックが定置サイトへと運搬される(図4-10)。運

搬用チューブを横坑の開口部へと移動させられるように、定置装置を載せた始動用チューブを最初に移動させなければならない。定置装置は始動用チューブよりも長いため、始動用チューブを移動させる前に、スライディング・プレートとリフト・パレットが取り外され、定置装置の下に押し込まれる。運搬用チューブと始動用チューブの位置は、それが定置位置に置かれた後に、調整可能な位置決めブロックを用いて横坑軸の方向に合わせて調整させる。最後に、スライディング・プレートとリフト・パレットが前に引き出され、定置装置に再び装着される。スライディング・プレートの取り外し及び再装着については今後最適化又は排除する必要があるが、現時点では産業利用する上では低速すぎる。スライディング・プレートと定置装置が移行ポイントを超え、始動用チューブから運搬用チューブへ、そして運搬用チューブから横坑へと移動する上で、始動用チューブと運搬用チューブの位置調整は重要な意味を持つ。

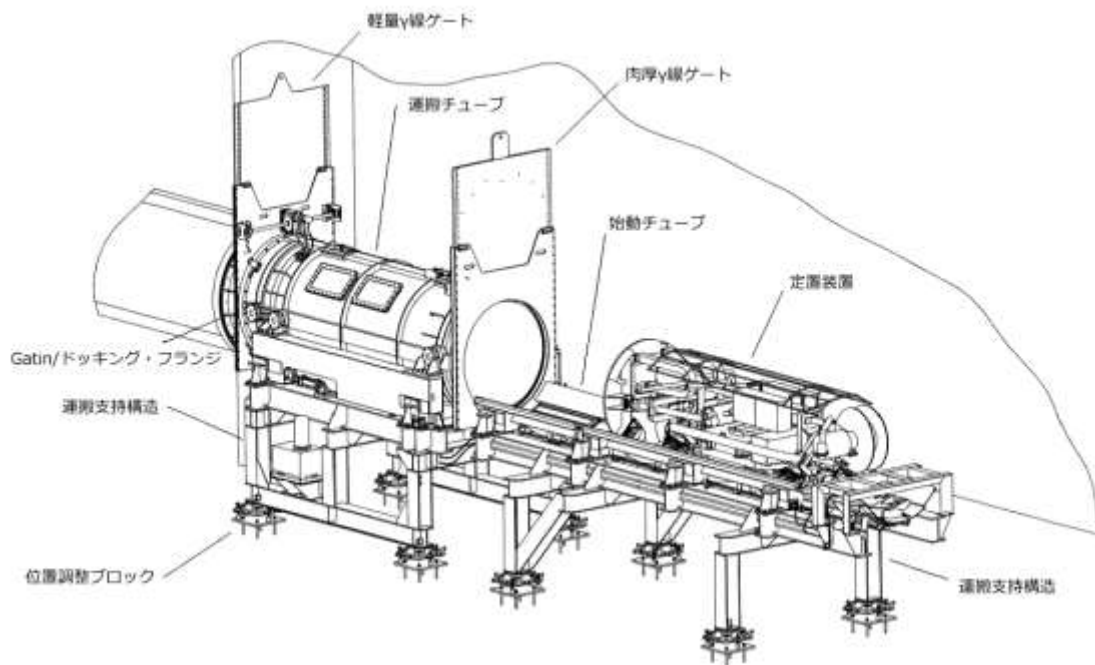


図4-10. 横坑の外に設置された運搬用チューブと始動用チューブの様子。運搬用チューブと始動用チューブは運搬支持構造上に置かれ、地面の上の位置調整ブロックを用いて正しい位置と高さに調整される。

2007～2009年のKBS-3H定置装置の運転試験時に、定置装置の横置き定置概念の性能評価の準備が整っていないことが明らかになった。操作員の日誌では、主として駆動中断、システム障害、定置装置のバランス機能に関する問題が報告されている。前回の試験 (Halvarsson 2008) と並行してある程度の機械面での強化がはかられたが、定置装置が、機械的な強化によって解決することのできない制御上の問題を抱えていることは明らかであった。ソフトウェア解析プロジェクトが2010年に実施され、次に示す一連の是正提案が示された。

- 制御ソフトウェア構造の修正を行う。
- その挙動に関する包括的な知識を得るために、定置装置に計器を取り付ける。



- 試験及びデータ記録を通じた定置装置の挙動調査を行う。
- 完全な制御性を実現する始動システムを設計する。
- 定置装置のバランス機能の制御方法を新たに開発する。

提供された制御ソフトウェアは、不適切な全体図を用いた複数のソフトウェア・モジュールから構築されたものであったことが判明した。その結果として、構造が複雑すぎ、機能の部分的な重複が認められ、機能シーケンスの連続性が失われていた。またソフトウェア自体も、運転面での例外事項、エラー処理、さらにはエラー復旧の面で完成度の低いものであったため、しばしば予想外の回復不可能なジャミング状況に陥った。操作員はユーザ・インターフェース上で中断が生じた理由を理解することができず、間もなく手動操作を試みることによってエラー処理を行うようになり、その結果としてエラー報告書には限定的な価値しかない仮定が記載されることになった。

こうした制御システムの構造的な問題以外に、より深刻な問題として、定置装置のバランスが崩れる事態が反復して起こったことが挙げられる。定置装置が負荷のバランスを維持することができない状態があらゆる状況において認められ、時にはバランスの崩れが回復不可能な状態に至ることもあり、設計目標を達成できていないのは明らかであった。定置装置は、パレットとスライディング・プレートの較正後の一定期間は良好に作動するが、最終的には定置装置がバランスを維持できない状況が生じることになった。この問題の理解は明確ではなく、また操作員には定置装置の正確な較正に関する規則が与えられていなかった。その結果として操作員はこの点でも、手動操作によって定置装置のバランスを取り戻す試みを通じてこの問題に対応するようになった。バランスを回復する通常の操作の1つは、バランスの回復を期待して数行程にわたり逆の動作を行うことである。しかし定置装置は自動運転され、手作業による介入を頻繁に必要としないはずであったことから、この問題の解決が2011～2014年の開発作業における最大の課題であることは明らかであった。

バランス機能に関する問題に関して以前に示された観察 (Halvarsson 2008) に基づき、バランス機能にとって、スライディング・プレートとリフト・パレットの横坑に対する位置調整がきわめて重要だという結論が示された。さらに、クッションの負荷のばらつきへの感度が高いことと、過度に不均等な重量分布に伴い管理できない問題が生じることも判明した。リフト・パレットがスーパーコンテナの下に正確に配置されることが最も重要だという結論も示された。提案された是正活動は、定置装置をより頑健かつ直線的な構造にし、リフト・パレットとスライディング・プレートの定置装置への固定方法を改善するというものであった。しかし2010年に行われたソフトウェア解析に基づき、制御システムの機構制御能力の不足の方が、機構面で頑健性の欠如よりも深刻な問題だという結論が示された。

このプロジェクトが開始される時点までに、従来のソフトウェアは、多くの欠陥があるものの、多くの有益なコードを備えており、したがって全く新しいアプリケーションを作成するのではなく、その修正をはかるべきだという決定がなされた。このためプロジェクトは、再構築作業に先立ち、ソフトウェア構造をさらに詳しく調査し、コードの出発点を記録することから開始された。同時に、その挙動を可能な限り包括的にカバーするよう定置装置の計装が拡大されるだけでなく、徹底的な機能調査ができるよう効率的な記録システムが適用

された。機械面では、定置装置の一部分に摩耗や変形があるものの、作業には適していると考えられたため、大幅な変更は計画されず、小規模の修理とオーバーホールのみが行われることになった。

2011～2014年に、「多目的試験」(セクション4.8.4)の一環として広範な機能面での改良がはかられた。この中には、コンクリート製の模擬物を用いた広範な試験プログラムと実際のベントナイト構成要素の設置が含まれていた。

次に示す措置により、定置装置の制御システムの機能性が大幅に強化された。

- 制御ソフトウェアの再構築。
- メモリー・マップの最適化。
- Pofibusコミュニケーションの最適化及び再構成。
- HMIタグと相互作用機能の再構成。

次に示す措置により、定置装置の制御とバランス機能が強化された。

- カウンター・バランスの制御の改善。
- 車輪制御の改善による定置装置の操縦性の改善。
- 水圧管理の制御、持ち上げ時間の制限、1回の行程の長さの制限による不安定さの低減。
- クッションの機能停止による能動的なバランス機能の導入。
- 能動的なパレット操作によるリフト・パレットが誤った位置に置かれることに起因してバランスが崩れた状態が生じることの防止。

強化された制御は全て、MPT定置試験で高い安定性を備えていることが証明された複合制御方式に統合された。さらに定置シーケンスの全てにおいて自動化レベルを高めることにより、手動操作が最小限化のものとなった。

定置装置の制御システムには、修正すべき構造問題が当初の見積りをはるかに上回っていたため、さまざまな部分的解決策を積み重ねてゆかなければ、バランス機能の問題の包括的な解決は実現できない状態にあった。最終的に定置装置は十分機能するレベルのものとなった。この定置装置の性能はMPT実験を行う上で十分なものとなっただけでなく、概念面での追加的な妥当性確認試験にも使用することができる。

将来の定置装置開発に関しては、制御システムのさらなる開発が可能となるためには、定置装置の機械面での改善を行う必要がある。注意が必要なトピックとして、次のものが挙げられる。

- 縦方向の負荷のバランスを取る機能。そのためには、パレットの高さセンサーを制御に利用できるようにするために、個別のクッションの制御を行う必要がある。
- 横方向の負荷のバランスを取る機能の強化。そのためには、負荷の移動に基づいてバランスを取るのではなく、機械的な力を使用する必要がある。
- 遮へい物の角度に合わせた調節が容易な固定式のパレット据え付け台。
- よりコンパクトな機械と、高さ調節能力が強化されたより強固かつより長い始動用チューブの設計。これによって定置装置の解体を行うことなく運搬を実施できるほか、横坑に合わせたシステムの位置調整が容易になるはずである。

一般に制御ソフトウェアの強化には膨大な数の処置を行うことができる。その例として、操作員インターフェース、情報及び言語の問題、エラー処理、アプリケーション・メンテナンスの容易さなどが挙げられる。しかし定置装置がプロトタイプである間は、これらの問題の重要性は低い。

#### 4.8 大規模試験と実規模試験

##### 4.8.1 緩衝材の膨潤圧の進展、「Big Bertha」(BB2-BB5試験)

このBB試験は、給水及びセンサー設置のための貫通孔を伴う大型金属管で行われた2分の1スケールの試験である。

Big Bertha試験「BB2」及び「BB3」の主な目的は、極端な条件下でのスーパーコンテナから外に向けた緩衝材の膨潤(BB2)と間隔ブロックからの緩衝材の膨潤(BB3)(すなわち、岩盤から水が追加されない場合でも岩盤壁に対する膨潤圧が形成されるかどうか)に関する調査を行うことであった。人為的に注入された水のみが利用可能であり、膨潤圧の上昇に寄与できるのもこの種の水のみであった。キャニスタから放出される熱によってその周囲の岩盤壁に熱に起因する剥離作用である「スポーリング」(熱によって横坑壁に生じる接線応力によって誘起される脆性破壊)が生じる可能性があることから、この問題は重要である。一定の対圧(ベントナイトからの膨潤圧によるもの)によりこの剥離作用の発生は防止できるものと考えられている。初期の試験結果によりこの種の条件(乾燥した横坑)においても膨潤圧が形成されることが示されているが、膨潤圧の規模に関する不確実性は依然として大きい(Kristensson et al. 2016)。

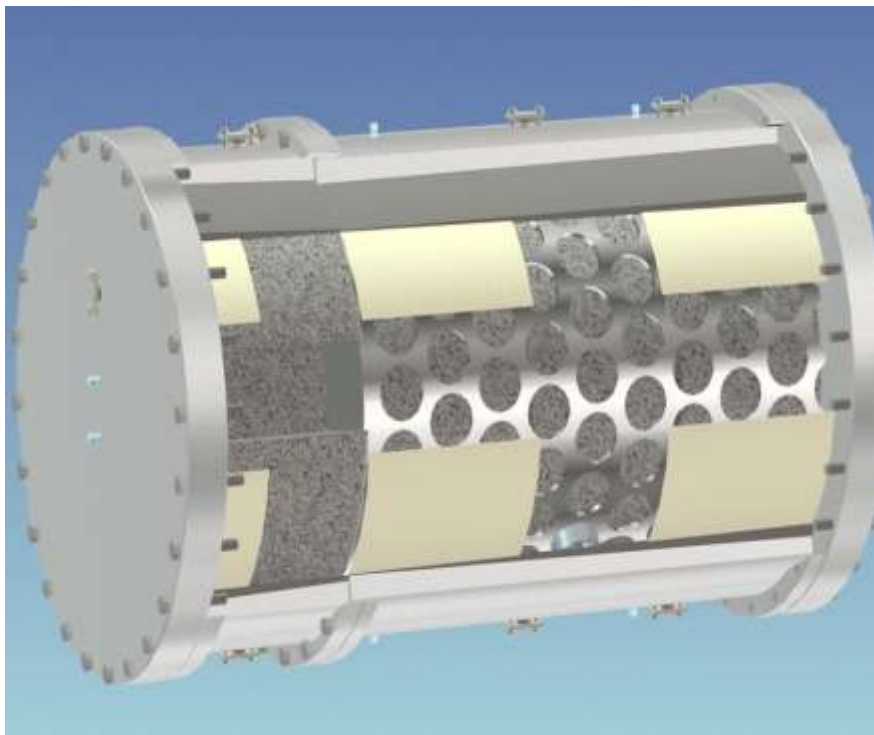


図4-11. 「Big Bertha」試験装置の概略図。

実験に使用された試験装置（Big Bertha）は、KBS-3H設計における大スケール試験を実施する目的で2003年に製作されたものである。当初の計画では長期的な均一化試験を実行することになっており、設置及び給水後にベントナイトには「岩盤」壁に設置されたフィルタから水が追加されるはずであった。これらのフィルタは、主図面において白色の部分として示されている（図4-11を参照）（Kristensson et al. 2016）。

全体としての試験装置は2つの区画で構成されている。1つの長さは1,050 mmで、もう1つの長さは350 mmである。当初の設計では、この2つの区画を合わせてその両端を蓋で閉ざすことにより、1つのユニットを形成するようになっていた。長い方の区画がスーパーコンテナ・ユニットに、短い方がスーパーコンテナのない間隔ブロックになる予定であった（Kristensson et al. 2016）。

この2つのユニットは2つの試験（BB2及びBB3）において別々に使用された（Kristensson et al. 2016）。

1. BB2：この試験では、DAWE設計に従って充填されたスーパーコンテナを収容した横坑区画のシミュレーションが行われた。同試験ではBig Bertha試験装置の長い方の区画が試験セルとして使用されている。
2. BB3：この試験では、DAWE設計に従って充填された間隔ブロックのシミュレーションが行われた。同試験ではBig Bertha試験装置の短い方の区画が試験セルとして使用されている。

2つの鋼鉄製の蓋が追加で製造された。こうして新たな蓋が追加されたことにより、2つの試験を同時に実施できるようになり、多くの時間を節約することができた。これらの試験はいずれも、乾燥したケース（すなわち隙間を人為的に充填した後には岩体から追加的な水が供給されない状況）のシミュレーションとなるものであった。両方の試験で人工給水には水道水が使用されている（Kristensson et al. 2016）。

## BB2試験

BB2試験で使用されたベントナイト・ブロックは、2012年中にSKB社に納入されたバッチのMX-80ワイオミング・ベントナイトを用いて製作したものであった。これらのブロックは、納入された状態の物質（含水率は10.5～10.7%）を用い、70 MPaの圧力で圧縮された。持ち上げを容易にするために、ブロックのそれぞれに2本の傾斜したボアホールがドリル掘削された。孔の直径は25 mm、深さは約300 mmであった。製造に伴い、ブロックの寸法と圧縮後に実現された密度が明らかにされた。運搬時、また製造及び加工時には、乾燥を防ぐためにこれらのブロックは二重プラスチック・カバーで覆われた（Kristensson et al. 2016）。

試験的な組み立てにおいて、ブロックの重量とブロックの高さが再度明らかにされ、その数値に基づいてブロックのかさ密度が算出された。ブロックがある程度膨張していることが判明したため、算出された密度は前回明らかにされた密度を若干下回っていた。

この試験で得られた最も重要な成果の1つは、半径方向の膨潤圧の推移に関するものであった。合計で4つの負荷セルが半径方向に設置され、軸方向の全圧を記録するために5つ目

の負荷セルが設置された。また2つの間隙圧センサーが、1つは注水弁に、1つは排気弁に接続された。周囲の環境条件を観測するため、試験セルの温度記録が作成され、室内の温度及び相対湿度が記録された。

この試験装置は、ルンド工科大学の構造工学部で組み立てられた。この試験で使用される全ての大重量構成要素の取り扱いにはオーバーヘッド・クレーンが必要であり、同大学の施設がこの種の重機の取り扱いに適していると判断された。オーバーヘッド・クレーンは、テスト装置の組み立てと解体の両方を行うために必要であった。

試験開始時に、約5 mの水圧がかけられた管を通じて水が注入された。試験セル内に空気が捕捉されないようにするために、吸気口/排気口の末端部は、排気弁が接続される位置が最も高くなるよう、わずかながら高い位置に配置されている。排気弁から水が出た時点で、両方の弁が即座に閉じられた。総給水時間は約4時間であった。この時間内に120.9リットルの水が注入されており、したがって平均流入速度は約0.5 l/分となる。スーパーコンテナと岩盤との隙間として利用可能な容積は119.53リットルと算出された。すなわち、注入量と利用可能容積との差は1.37リットルになる。この相違は、4時間の充填時間に生じたベントナイトによる水の取り込みが起きたことによって説明されることが見込まれる。間隙圧は、吸気弁と排気弁を閉じるとすぐに増加している。

解体後に、ベントナイトから合計で582件のサンプルが採取され、含水率と密度の分析が行われた。

半径方向の全圧が、測定のために選ばれた2つの断面において著しく異なっていたことから、これらの位置のベントナイト条件に関する情報はきわめて興味深いものであった。図4-12に、4つの位置の全てにおけるスーパーコンテナと岩盤の間の隙間における含水率のばらつきを示した。スーパーコンテナと岩盤の間の隙間の最も外側の部分では、横断面Cにおける含水率が最も大きくなっているのは明らかである。スーパーコンテナ・シェルの近辺における含水率の差ははるかに小さくなっている。

セルの壁に最も近い部分の乾燥密度と膨潤圧との間に、明瞭な相関関係が見いだされる。軸方向の全圧測定場所から採取されたサンプルの飽和度は75.9%であった。この乾燥密度を備えたMX-80が完全に飽和した場合、相対的に著しく高い膨潤圧を発生させるものと予想される。

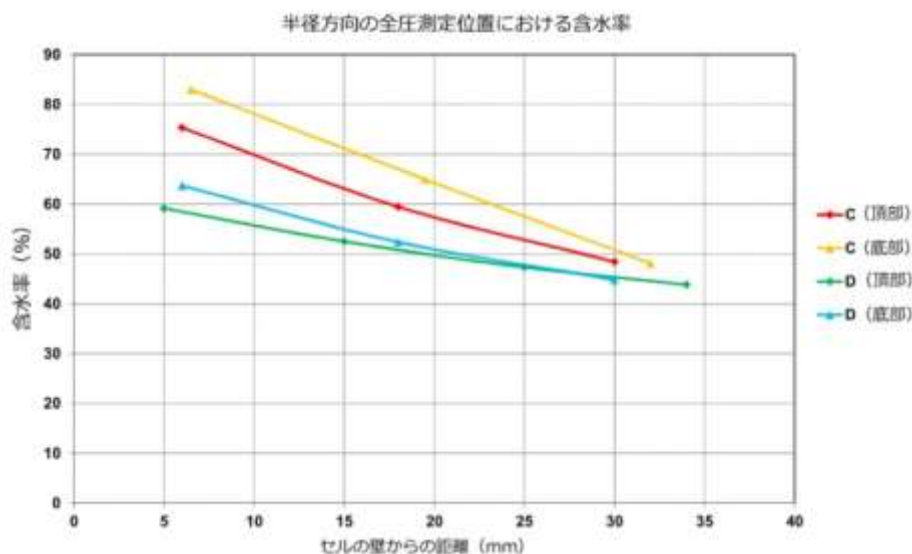


図4-12. 半径方向の全圧測定位置で採取されたサンプルの含水率。断面Cのセルの壁に近い部分の含水率は明らかに高くなっている。

分析のために選択されたこれらの断面における含水率と乾燥密度の分布の良好な全体像を把握するために、多くの努力が費やされた。含水率、乾燥密度及び飽和度のプロファイルが、試験セルの壁からの半径方向の距離の関数としてグラフ上にプロットされた。

スーパーコンテナ・シェルの穿孔から押し出されたベントナイトから、いわゆる「マフィン」が形成される。押し出されたベントナイトが試験セルの壁に到達すると、押し出されたベントナイトの「頂部」は直角方向に押し伸ばされた。その結果として、試験装置の解体時に観察された「マフィン」状の形状が形成されることになった。

これらの試験ではいくつかの問題が生じたにもかかわらず、BB2試験は著しい成果を挙げた。記録されたデータにより、試験開始のほぼ直後に4つの測定点全てにおいて半径方向の圧力が上昇し始めたことが示されている。試験開始から最初の80日間で、正の水圧が記録された。水圧は試験の開始当初に上昇し、約2日後には最大値の65 kPaに至ったが、80日後にはゼロまで低下している。

### BB3試験

試験装置には、BB装置の短い方の区画が使用された (図yyyi)。ベントナイト・ブロックは、BB2で使用されたブロックとほぼ同一の方法で、同じMX-80ベントナイトを用いて製造されたが、いくつかの異なる特徴があった。間隔ブロックは、乾燥密度が低く、含水率が高くなるように設計された。このため原材料は含水率が21.4%になるように混合されており、スーパーコンテナ内部のベントナイト・ブロックと同じ圧縮圧で圧縮された。間隔ブロックのかさ密度はスーパーコンテナ内部のベントナイト・ブロックとほぼ同じであるが、含水率は比較的高く、乾燥密度は比較的低くなっている。

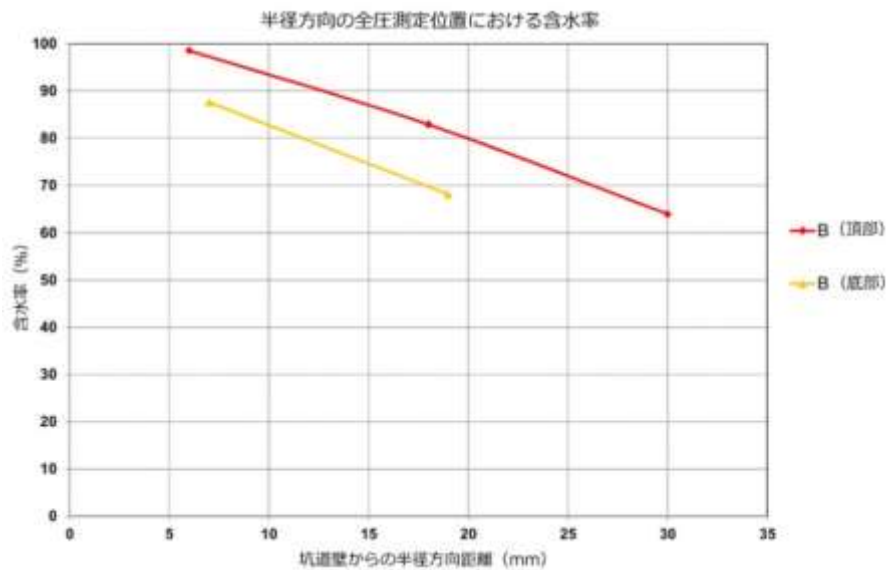


図4-13. 半径方向の全圧測定位置で採取されたサンプルの含水率を、試験セルの壁からの半径方向の距離を関数としてプロットしたグラフ。

サンプリング計画は大きな成功を収めたと見なされており、失われたのは5つのサンプルのみであった。予定された315件のサンプルのうち、310件の採取に成功し、これらに対して含水率と密度の分析が実施された。

間隙圧は解体時にはゼロだったため、全圧は全て膨潤圧であったと考えることができる。半径方向の膨潤圧は試験装置の解体時にはいずれもほぼ同様のものではあったが、底部で記録された膨潤圧はわずかに高くなっていた。図4-13に、半径方向の全圧測定位置で採取されたサンプルの含水率を示した。底部のサンプルでは乾燥密度が若干高くなっていた。この場所の膨潤圧がわずかに高いため、これは予想されたことであった。

これらの断面における含水率と乾燥密度の分布に関する良好な全体像を把握し、その分析を行うために、多くの努力が費やされた。含水率、乾燥密度及び飽和度のプロファイルが、試験セルの壁からの半径方向の距離の関数としてグラフ上にプロットされた。

BB3試験の圧力挙動は、BB2の場合とかなり似通ったものであった。隙間が水で満たされ、弁が閉じられた直後に、水圧が上昇し始めた。30日後に最大水圧となった約45 kPaに到達した。

この2つの試験（すなわち、BB2及びBB3）は、KBS-3H設計に基づいて乾燥した定置横坑内にスーパーコンテナと間隔ブロックを設置した場合の膨潤圧の挙動と膨潤圧の推移に関して、重要な情報をもたらすものと考えられた。またこれらの試験により、こうした条件においても岩盤壁に対して一定の圧力が形成されることも示されている。このことは、岩盤の壁の熱スポーリングを防止する上で好ましいものだと考えられる。しかし達成される圧力がスポーリングの発生を防ぐ上で十分高いものかどうかは明らかになっていない。

#### BB4試験

「BB4試験」と呼ばれる試験の主な目的は、スーパーコンテナを含む横坑区画における緩



衝材の膨潤について調査することになった。この区画におけるスーパーコンテナの設置は、DAWE設計に従って、岩石マトリクスから水が自由に得られる状況（すなわち、設置後に残存する空隙が水道水によって人為的に満たされ、その上でベントナイトが岩石マトリクスから追加される塩水にアクセスしている状況）にある横坑で行われた。

この試験の意図は、人工給水と最初の6ヶ月間のベントナイトの膨潤挙動に関連する一定数の問題に関する重要な情報を、実規模において入手することにあった。研究対象とするべき重要な問題として、初期の水の取り込み速度、スーパーコンテナと岩盤の間の隙間内へのベントナイトの膨潤と、それがスーパーコンテナ・シェルの穿孔によってどのような影響を受けるのか、また岩盤壁に対する半径方向の圧力の形成などが挙げられる。さらにこれらの試験結果が、エスポHRLにおける実規模「多目的試験」(MPT)における緩衝材の挙動に関する予測の基礎となることが意図されていた。

BB4試験の結果から、次に示すようなコメント及び結論が得られている。

- 最初の3日間に、約1.6リットルが試験セルから押し出された。当該系が開かれたものであったため、これはベントナイトの初期膨潤がもたらした結果であった。この試験設計は、現実のケース（おそらく岩盤内に高い背圧が生じ、これにより横坑からの水の流出が妨げられる）からの逸脱を伴うものである。閉じた系では、その代わりに間隙圧の上昇が生じることになる（たとえばBB2試験の結果などを参照）。
- 試験が45日間経過した後、400 kPaの水圧がかけられた。60～182日目（試験の終了日）には水の取り込みはどちらかという一定したものであった。しかし時の経過と共にわずかながら低下する傾向が見られた。
- この試験は、実際の条件が成立している期間のうちの短期間におけるスーパーコンテナ・シェルの穿孔を通じた膨潤挙動を良好に表していると考えられた。隙間の幅とブロックの初期密度は、実規模での使用が計画されているものに近いものであった。
- 半径方向の圧力測定の結果は、これらの条件において、シェルに開けられた穿孔と穿孔との間の領域において岩盤の壁に生じる圧力上昇はきわめて低いものになることを示している。しかし、スーパーコンテナ・シェルに開けられた穿孔の上の部分には、おそらく膨潤圧が作用している（まだ継続されているBB5試験で見いだされた兆候による）。試験開始から約6ヶ月の時点での岩盤への半径方向の圧力には、スーパーコンテナ・シェルの穿孔との位置関係に応じて、0から200～400 kPaの範囲となっている（BB5の結果：このBB5は2017年のなるべく早い時期に解体される予定である）。
- 飽和度は、スーパーコンテナと岩盤の隙間から採取された全てのサンプルについて、それぞれの結果にある程度のばらつきはあるものの、100%と評価された。その後飽和度は、約150 mmの長さ（試験セルの壁から50～200 mm）にわたり、当該ブロックにおける初期値まで、ほぼ線形に低下した。ブロック最も奥の100 mm（試験セルの壁から300～400 mm）の部分は、ほとんど影響を受けていなかった。

BB4試験は、岩盤から追加的な水が供給される場合に、スーパーコンテナの周囲における膨潤挙動と膨潤圧の進展について、重要な情報を示すものと考えられている。この試験により、スーパーコンテナと岩盤の間の隙間が、どちらかといえば設置後すぐに膨潤したベント

ナイトによって満たされることが示された。しかしこの物質の密度のばらつきが大きいため、岩盤に作用する膨潤圧のばらつきも大きくなる。

もう1つの試験であるBB5は、現在も実施されており、完全な飽和状態となった後に終了する予定である。この2つの試験の結果は、KBS-3H処分におけるスーパーコンテナ・ユニット内のベントナイト水の取り込み、膨潤及び均一化に関する重要な情報を提供するものである。

現実の処分場における幾何学的形状や温度はこれらの試験条件と異なることには注意すべきであろう。試験期間が短かったことから、幾何学的形状の違いが、BB4試験との比較において、実際の規模の処分場における結果に著しい影響を及ぼすとは考えられていない。熱による温度上昇が、ベントナイト・ブロックの内部を乾燥させる。すなわち、半径方向の温度勾配が拡大し、ベントナイト・ブロックの内部を乾燥させることになる。これにより、半径方向の含水率の勾配が高まるだけでなく、ベントナイト・ブロックに割れを生じさせる可能性もあり、このことが湿潤変遷に影響を及ぼす可能性がある。

#### 4.8.2 過渡領域試験

過渡領域試験 (Kristensson et al. 2016) の主な目的は、ラボ施設において均一化が成立した後の横坑プラグに作用する膨潤圧の上昇と最大圧に関する調査を行い、密度が変化しない過渡領域の長さを明らかにすることにあつた。さらにその結果は、関係するさまざまなプロセスに関する解析的モデルと数値的モデルの評価に使用された。図4-14にこの試験の概略図を示した。

この試験では、1 : 10.8のスケールで、プラグと接触している過渡領域 (プラグ及び過渡ブロックの近くのペレット充填物と、間隔ブロック区画の一部を含むもの) のシミュレーションが行われた。試験装置はDAWE設計に従って湿潤化され、ベントナイトを取り巻く岩盤を模した半径方向のフィルタから出る水によって飽和状態となり、均一化するまで放置された。試験中に膨潤圧と水の取り込みに関する測定が行われ、完全な飽和状態と均一化が成立した後で当該試験装置が解体され、慎重なサンプリングが行われた。

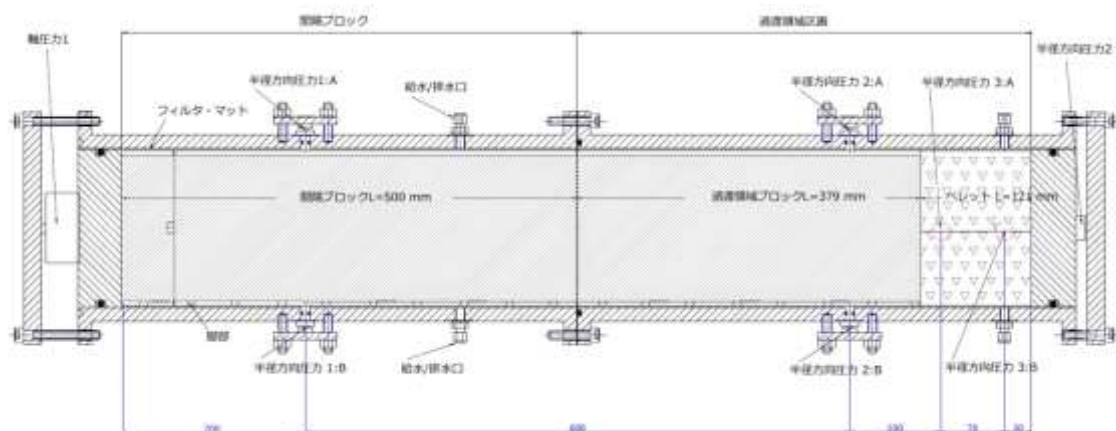


図4-14. 試験レイアウトの概略図。内側の半分 (左500 mm) は「間隔ブロック区画」、外側の半分 (右500 mm) は「過渡領域区画」と呼ばれる。

この試験の結果により、以下の状況が示されている。

- 当初は、ベントナイト・ブロックの軸方向に2～3%の均等な膨潤が見られるが、これはおそらく、周囲の壁との摩擦が作用し始める前に生じるまらにみか継ぎ目部分の間に生じた初期湿潤化によるものである。
- 開始当初に数%の範囲で軸方向に均等な膨潤が生じた後にも、試験区間の2分の1にわたって追加的な膨潤が起こらず、影響が生じなかった領域が存在した。この長さは、ベントナイトと周囲のフィルタとの間の摩擦角を10°とした解析的モデルで得られる結果と対応していた。
- 影響を受けない領域と模擬横坑プラグとの間で、ブロックの膨潤、ペレット充填材の圧縮、壁に対する摩擦に起因する密度の低減が見られ、平均密度勾配は摩擦角が10°の場合の予測値と良好に対応していた。
- 「横坑プラグ」に対する膨潤圧は、摩擦角を10°とした場合の予測値よりも高くなり、摩擦角を5°とした場合の予測値の方とより良好な一致を示した。

この試験の主な結論は、残存している密度勾配において、過渡領域が予想とおりの機能を果たしているというものであり、この密度勾配は、横坑プラグに対する膨潤圧を、ベントナイトと岩盤の間の摩擦角が5°～10°の場合の間隔ブロック区画における膨潤圧との比較において、低減させるものである。しかし状況と応力の変遷は、解析モデルによってモデル化されたものよりも複雑である。したがって、これらのプロセスや結果に関する理解を高めるために、有限要素法を用いたモデル化の実施が提案されている。

#### 4.8.3 実証

初期のKBS-3Hプロジェクト（SKB 2012）の焦点は、定置装置の開発、横坑のリーミング、プラグ及び緩衝材の試験など、装置や構成要素を対象とした試験に合わせられている。KBS-3Hのシステム設計フェーズでは、鍵となる構成要素のサブシステム・レベルでの統合が、「多目的試験」（MPT）と呼ばれる試験において行われている（セクション4.8.4）。これに加えて、KBS-3H要件に従って長さ300 mのパイロット孔のドリル掘削が可能であることの実証にも焦点が合わされた（セクション4.8.6）。高温キャニスタをスーパーコンテナ内に収納した場合の緩衝材の挙動の実規模実証も行われている（セクション4.8.7）。

#### 4.8.4 多目的試験（MPT）

エスポHRLで実施された「多目的試験」（MPT）（図4-15）の目的は、実規模のKBS-3H構成要素の地下への設置可能性を実証することにある。したがってこの試験の焦点は、構成要素の製造、横坑の特性調査及び準備、構成要素の組み立て及び設置に合わせられている。この試験は非加熱試験であり、試験装置はKBS-3Hのレファレンス設計DAWEに従い、95 mの横坑「DA1619A02」の最も奥の部分に設置されている。

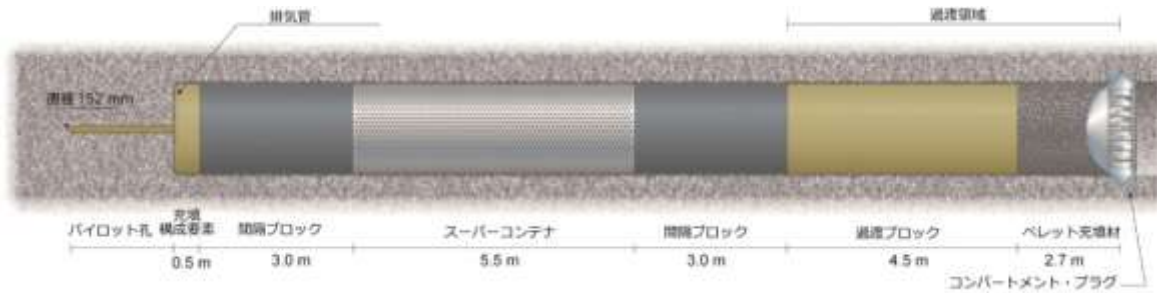


図4-15. MPTレイアウトの概略図。この中には、両側をベントナイト間隔ブロックに挟まれたスーパーコンテナと、付随する過渡領域（ベントナイト・ペレットとベントナイト過渡ブロックが満たされた区画）を伴うコンパートメント・プラグが含まれている。

MPTの主な目標は次のとおりである。

- 設計の実現及び構成要素の機能の初期検証を行うために、システム構成要素の試験をそれぞれの実規模において、またお互いの組み合わせにおいて行うこと。
- この中には、実規模の構成要素を製造し、その（DAWEに従った）設置を実行し、MPTの初期のシステム状態とその後の変遷をモニタリングする能力が含まれている。

MPT試験は、LUCOEXプロジェクトの一部となるものである。このプロジェクトはユーラトム/FP7から資金の提供を受けており、その総合的な目標は、原位置において、また一定数の概念実証施設を通じて、処分及び地層処分施設の安全かつ信頼できる建設、構成要素の製造、シーリングの技術的な実現可能性を実証することにある（Gugala et al. 2015）。

MPTに組み込まれる鍵となる構成要素の1つは、スーパーコンテナである。そのレファレンス設計にはチタン製シェルが含まれているが、MPTでは鋼鉄製のものが使用されている。その理由は、このタイプの試験では、形成されたシェルから生じる腐食生成物が緩衝材に及ぼす影響などの長期挙動を適切な方法で研究することはできないことにある。スーパーコンテナにより、その周囲に設置された間隔ブロックは分割される。横坑はコンパートメント・プラグを用いてシーリングされる。それに関連する過渡領域は、過渡ブロックとベントナイト・ペレットで構成される。過渡ブロックの設計は間隔ブロックの設計と同一であり、ペレットで満たされた区画における緩衝材の密度の低下を相殺するために使用される。KBS-3H構成要素に関する詳細については、『KBS-3H補足的研究（2008～2010年）』（SKB 2012）及び本報告書の第4章を参照のこと。

圧力（膨潤圧と間隙圧）、湿度、温度、変位、さらにはプラグを通じて生じる漏水のモニタリングを行うために、複数のセンサーが設置される。試験終了後に、それぞれの構成要素の解体及びサンプリングにより、緩衝材の均一化に関する事後検討データが入手される。試験の継続時間は、試験自体の変遷に応じて決定されることになる。

MPTの設置には、次に示すように、レファレンス設計のKBS-3H処分場の建設に伴う段階の全てが含まれ、この上でモニタリングが行われる。

- 横坑の特性調査及び準備（Kronberg 2015）。
- 緩衝材の製造：この中には新たな型枠の設計及び製造が含まれる（Johannesson 2014）。
- 構成要素の組み立て（Kronberg 2015）。
- KBS-3Hのベントナイト構成要素の設置（文献 [Kronberg 2015] 及び [Ojala & Von

Numers 2014])

- DAWEに従ったコンパートメント・プラグを用いた横坑の閉鎖と、その後の給水及び排気作業 (Kronberg 2015)。
- 緩衝材の初期の変遷に関するモニタリング (文献 [Pintado et al. 2015] 及び [Pintado et al. 2016a])。

MPT作業には定置装置の制御システムの改善及び再構築も含まれ、その目的は、全ての構成要素に関してロバストな定置シーケンスを確保することにある (Ojala & Von Numers 2014)。

### 緩衝材の製造

SKB社とポシヴァ社は、KBS-3Vのための実規模のブロック製造に広範な経験を得ている (Johannesson 2002)。しかしKBS-3Hのベントナイト・ブロックの場合、直径が若干大きく、また新たな型枠も製造しなければならない。

表4-4に、MPTに関する要件と製造されたブロックの数を列記した。ワイオミングMX80ベントナイトが使用され、圧縮に先立って物質分析プログラムが実施されている (Johannesson 2014)。その物質要件には、硫酸塩、総硫黄含有量 (硫化物を含む) 及び有機炭素が含まれている (表2-7)。モンモリロナイトの含有量は90%として測定された。これは規定された75~90%という要件の上限である。

圧縮施設面での制限により、ブロックの高さの最大値、スーパーコンテナ・リングのレファレンス設計で規定されている1,211 mmではなく、500 mmとされることになった。

全てのブロックは基本的に、事前に設定された要件に従って製造されている。ごく少数のブロックにおいて、含水率が要件をわずかに下回ったり、密度が要件をわずかに上回ったりする例が見られた。その主な理由として、この試験のためのブロック製作以前に広範な試験シリーズが実施された例がないことが挙げられる。しかし上述した逸脱はごく小さいものであり、それによって試験の評価に影響が及ぶとは見込まれなかった。また、将来により広範な試験シリーズが実施され、圧縮パラメータの最適化がなされた場合に、諸要件に従ったブロック製造に関していかなる問題も生じないと考えられた。

表4-4. MPTに関する要件と製造されたブロック数

ブロックのタイプ	ブロック数	含水率 (%)	乾燥密度 (kg/m <sup>3</sup> )	外径 (mm)	高さ (mm)	内径 (mm)
間隔/過渡/横坑末端ブロック	27	21±1	1,712±20	1,765±1	485±1	
スーパーコンテナ・リング	12	11±1	1,885±20	1,740±1	485±1	1058±1
スーパーコンテナ・ブロック	4	17±1	1,753±20	1,740±1	428/350±1	

試験用のペレットは押出成型手法を用いて製造された。物質の分析、圧縮及び結果に関する詳細は、MPT緩衝材に関する作業報告書（Johannesson 2014）に収録されている。

## 定置装置

当初、ESDREDプロジェクト（[www.esdred.info](http://www.esdred.info)）で開発されたKBS-3H定置装置では、構成要素の定置横坑内への搬入に、ウォーター・クッション技術が利用されていた。MPT定置装置の詳細についてはセクション4.7を参照のこと。

## 横坑の特性調査と準備

MPT構成要素を設置する試験区画（L=19 m）の特性調査では、主な流入領域を明らかにするために小型の堰が用いられた。漏出量は、スーパーコンテナと内側の間隔ブロックが後に設置される最も奥の場所における流入量により、32 L/日と測定された。漏出点に焦点を合わせた試験区画の地質学マッピングも行われた。またレーザー・スキャンも実施されている。

プラグのV字形の切れ込みは円形レールを用いて彫られた。これによって平行な切り口ができ、そこで生じた岩石の断片は後に脆くなって壊れた。切削手法の詳細は文献[Kronberg 2015]に記されている。

締め付けリングと呼ばれるプラグの構成要素がこの切れ込みに置かれ、打設された。締め付けリングは横坑の準備時にすでに製作されているため、その後は溶接のみを必要とする迅速なプラグ設置が可能になる。

横坑の位置が原因となり、センサーのケーブルを、通常想定されているように、横坑壁を経由して近くの並行坑道まで通すことができなかった。その代わりに全てのケーブルの設置作業はプラグを通じて行わざるを得なかった。横坑の両側で切り抜き作業が行われ、配管が設置された。緩衝材の密度喪失を最小限にするために、切り抜きのかなりの部分には低pHコンクリートが打設された。開口部は、ベントナイトその内部及び配管の周囲に膨潤してくるよう放置され、それによりコンクリートと岩盤との間に流動経路が生じるリスクが最小限となるようにされた。図4-16に、設置準備のための計装を施した横坑の様子を示した。頂部及び側面には、岩盤内に設置された全圧センサーが見られる。また岩盤内には間隙圧センサーも取り付けられている。



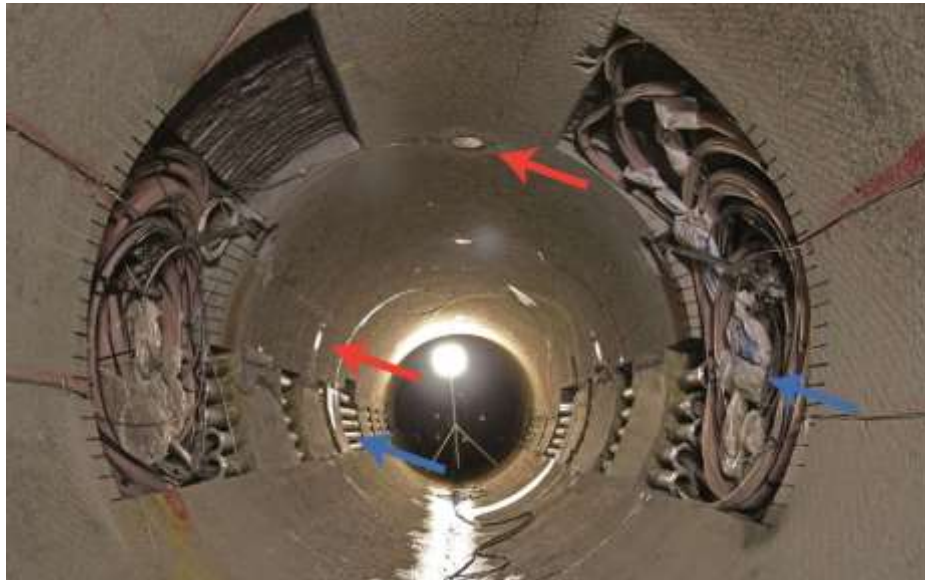


図4-16. 設置の準備が整った状態の横坑。プラグの締め付けリングはほぼカメラの位置に打設されている。全圧センサーは赤色の矢印で、ケーブル配管は青色の矢印で示した。

#### 構成要素の組み立て

MPTが実施されるまで、KBS-3Hプロジェクトにおいてベントナイト製の実規模構成要素が組み立てられたことも、設置されたこともなかった。この理由から、ベントナイト間隔ブロックを使用した組み立て手順、運搬及び設置に関する予備試験が実施されることになった。この試験はきわめて価値の高いものであることが明らかになり、これに伴って得られた重要な経験として、プラスチックによる保護を伴う組み立て戦略が不適切なものであると判明したことと、ブロックの割れを避けるために組み立て作業場所に相対湿度を制御する装置を設置しなければならないことが挙げられる。小さな表面割れが形成されることにより真空式持ち上げ工具が正しく機能しない場合に備えて、ブロックを持ち上げる機械的な工具も開発された。定置装置による持ち上げとその下での排水を可能にするために、間隔ブロックを支えるブロック脚部の設計に重要ではない変更を加える必要も明らかになり、いくつかの金属の尖った部分が滑らかにされ、脚部の高さがわずかに大きくされた。これらの経験や、それ以外の多くの経験が、その後の実際のMPTの組み立て及び設置に活かされている。

組み立て作業中には、それぞれ幅485 mmの間隔ブロック「薄片」の中心に合わせて、1対の脚部が設置される。このことは、これらは水平に置かれた状態では不安定であることを意味する。こうした「薄片」がいくつか集まって1つの間隔ブロックを形成しており、これらの安定性を確保するために、間隔ブロックの全長内に、3本のロッドが軸方向に設置された。これらのロッドによってブロック「薄片」が緊密なものとなるため、DAWE給水手順の開始時にセンサーが水に浸かるリスクが限定されることになる。これらのロッドの利用は、2対の脚部を備えた（したがってそれ自体で安定している）比較的長い「薄片」が使用されるレファレンス設計からは逸脱しているが、ロッドが間隔ブロック内に深く入り込む



ことの効果はきわめて限定的なものを見なされている。

計装計画に従い、ベントナイト・ブロックの両端にセンサー用の孔がドリルで開けられるか、彫られた。図4-17に、構成要素と計装が施された区画の位置を示した。粘土の膨潤が開始されることによる損傷リスクを最小限にするため、全てのケーブルは鋼鉄管内に収容する形で保護されている。

岩盤と構成要素の間には42.5 mmの環状の隙間しかないことから、全ての配管とケーブルをベントナイト構成要素の周縁部内に収容しなければならなかった。このため、定置作業時にケーブルを保護できるよう、それぞれの構成要素の底部に金属製のケーブル・ブロックが設置された。このケーブル・ブロックは定置後に撤去された。組み立て作業場所の相対湿度がブロックに合わせて最適化されたため、それ以上の表面割れは生じることがなく、真空式ツールを用いたブロックの持ち上げが可能となった。

スーパーコンテナの組み立てにも同様の手順が使用されたが、ブロックはスーパーコンテナ・シェルの内部に置かれたため、ロッドは必要とされなかった。図4-17に、計装を施された区画の位置を示した。組み立て時の真直度を確保するために、シェルの外側に一時的な「補強材」が使用された。スーパーコンテナの組み立てに先立って異なる含水率（17%及び11%）の末端ブロック及びリングが使用される現行設計では、組み立て作業場所の相対湿度を、この2つの異なるタイプのブロックに合わせて同時に最適化することはできないものと認識されている。実際の取り扱い作業の観点から見た場合、貯蔵時に、圧縮及び機械加工が実施される時点で、含水率が統一された物質及びブロックを取り扱う状態となることが望ましい。このことは、スーパーコンテナ内の緩衝材ブロックが再設計されることを意味する可能性がある。しかしこの再設計は、それが長期安全性に負の影響を及ぼさないことが示されることによって初めて可能となる。加熱を伴うスーパーコンテナ試験（セクション4.8.7）では、ブロックの含水率を14%で統一する可能性を示すための試験が成功裡に終了した。



図4-17. A) 計装を備えた区画を伴う多目的試験 (MPT) 間隔ブロック及び過渡ブロック。  
B) 計装を備えた区画を伴うMPTスーパーコンテナ。

#### 設置

MPTの設置は、2013年11月14日から12月7日にかけて実施された (Kronberg 2015)。構成要素は、エスポHRLのアクセス坑道を下って-220 mレベルにある運搬用チューブ内部まで1体ずつ運び込まれた。運搬用チューブは横坑の外に置かれ、その背後に定置装置を伴う始動用チューブが置かれた。定置装置が運搬用チューブを移動し、構成要素をつかみ、その構成要素を自動的に横坑内部の所定位置へと押し出した。全体として、さまざまな定置作業は良好に機能し、自動化されたシーケンスによってほとんどの制御が管理され、最後に若干の手動による微調整が行われた。構成要素間に良好な接触が達成された。組み立て時に測定された4つの構成要素の長さの合計と、定置された構成要素の全長との間には、4 mmの違いしかなかった。この相違は測定許容誤差の範囲に収まるものと想定されている。図4-18に、設置後のスーパーコンテナの状態を示した (総重量は約45トン)。定置装置のウォータークッション・システムから構成要素に若干の水しぶきが生じていることが認められた。しかしこれはMPT設置時の構成要素の健全性に影響を及ぼすものではなかった。こうした水しぶきを回避するため、将来の開発では、何らかの機械面での改良をはかることが提言されている。



図4-18. 横坑内に設置されたスーパーコンテナ。ケーブルは全て引き込まれた状態となっている。スーパーコンテナが横坑にぴったりと合っている状況を明瞭に見て取れる。定置装置が次の構成要素の設置時にスーパーコンテナを確実に検知できるように、スーパーコンテナの左側の下に小さな紙が置かれている。

全ての構成要素が定置された時点で、コンパートメント・プラグが設置された。コンパートメント・プラグの技術的詳細は文献 [Posiva 2016e] に記載されている。コンパートメント・プラグの設置作業は3つの主要ステップに分けて行われた。最初にカラー（4つの鋼鉄部分で構成されている）が以前に設置された締め付けリングに溶接された。次に全てのケーブル及び配管がカラーを通され、最後にキャップが持ち上げられて所定の位置で溶接された。

プラグが設置された上で、プラグ内のペレット充填孔を通じてペレットが設置された。プラグは認証済み企業による検査を受けていたが、溶接部に2つの孔（ペレットの埃が1つの孔を通じて漏れるのが見られた）があること指摘され、再溶接を行わなければならなかった。この点については後述する検討を参照のこと。ペレット充填後に、2組の管を通じた接触グラウチングが、鋼鉄とケーシングとの間で、またケーシングと岩盤との間で行われた。接触グラウチングはシリカゾル・グラウトを用いて実施された。

これらが完了した後で、全てのセンサーが「データ取得システム」(DAS) に接続され、チェックを受け、モニタリングが開始された。設置の最終ステップはDAWE手順であった。この手順では、水がプラグ底部の配管を通じて供給される一方で、横坑前面の頂部につながる長い排気管を通じて排気が行われた。KBS-3Hレファレンス設計では、水位が最高点に達し、水が排気管から流れ出した時点で、排気管の撤去が開始されることになっている。しかしこのケースでは、当該区画にわずかな過圧が適用され、これにより試験で使用するセンサーの一部の機能チェックを行えるようになっていた。プラグ溶接部分に新たに漏出が認められ、この溶接部が再度溶接された。こうした漏出が原因となり、プラグ設計の変更が行われた。この変更により、溶接部へのアクセスが改善され、給水に先立って溶接部の検査を行

えるようになった。今後もう1つの更新点として、プラグ底部に排水管が追加される予定である。これは、プラグの設置フェーズ中に、キャップの所定の位置への溶接とペレットの設置に先立ったカラーの内側が水で満たされる事態を回避するために必要な措置である。提案された更新の詳細については、文献 [Posiva 2016e] を参照のこと。

### モニタリングの状態

試験は現在モニタリング期間にある（2016年7月現在）。当初は、事前モデル化によって適切な試験継続期間が決定できるものと考えられていた。しかしこのモデル化では、主として穿孔を伴うスーパーコンテナ・シェルを通じたベントナイトの押し出の概念化に関して、さまざまな問題が発生した。この事実の結果として、解体期日は実際の試験から得られる測定値と望ましい解体条件に基づいて決定されることになり、この期日はまだ決定されていない（2016年7月現在）。測定値は、緩衝材が水和状態にあり、ブロックとスーパーコンテナ・シェル、そして岩盤との間の隙間で加圧が生じていることを示している。横坑の壁に取り付けられたセンサーで測定された圧力の一部分は膨潤圧である可能性があるが、どの程度の比率を占めているのかを知ることはできない。ブロックとスーパーコンテナ・シェル、そして岩盤との間の隙間はおそらく低密度ベントナイトで満たされている。内側の隙間については何の結論も示すことができないが、おそらく開いているものと考えられる（ブロック内側部分に置かれた容量型湿度計と乾湿計は、吸引力が依然として高いことを示している）。水供給量が一定の穿孔試験により、ベントナイトが全ての隙間空間を満たしていることが示された。岩盤と隙間における間隙圧の測定によって正の圧力が示されているため、MPT試験でも同じ状況にあると予想することが可能である。試験開始時には、ブロックの吸引力が大きいため、岩盤の薄い層が不飽和状態となっていた可能性もあるが、すでに述べたように、現在の間隙圧測定値は岩盤が飽和状態にあることを示している。

#### 4.8.5 エスポの新規KBS-3H試験サイトと操縦を伴うコアドリル掘削

KBS-3Hプロジェクトでは、エスポHRLの深度-220 mの試験サイトが利用できる。ここには長さが15 mと95 mの2本の定置横坑が掘削されており (Bäckblom & Lindgren 2005)、後者がMPTの設置場所である。現在エスポHRLの深度-400 mで、TASU坑道内に新たなKBS-3H試験サイト (TAS08) が開発されているところである (図4-19) (Nilsson 2015)。ボアホールK03009F01とK08028F01は新規ボアホールであり、以下のセクションで説明する。K08028F01のドリル掘削はMPTの場合と類似したものであり、LUCOEXプロジェクトの一部として、部分的にECからの出資を受けている。

この新規試験サイトでは、オプションとして処分場深度で直径1.85 mまでのリーミングを行えるほか、パイロット・ボアホールのドリル掘削手法の性能に関する実証及び検証を行うことができる。リーミング後に、メガ・パッカー手法を用いて事後グラウチングを行うことも可能である (Eriksson & Lindström 2008)。リーミング及びメガ・パッカーの作業の実施は、予定されている次のプロジェクト・フェーズに延期されている。

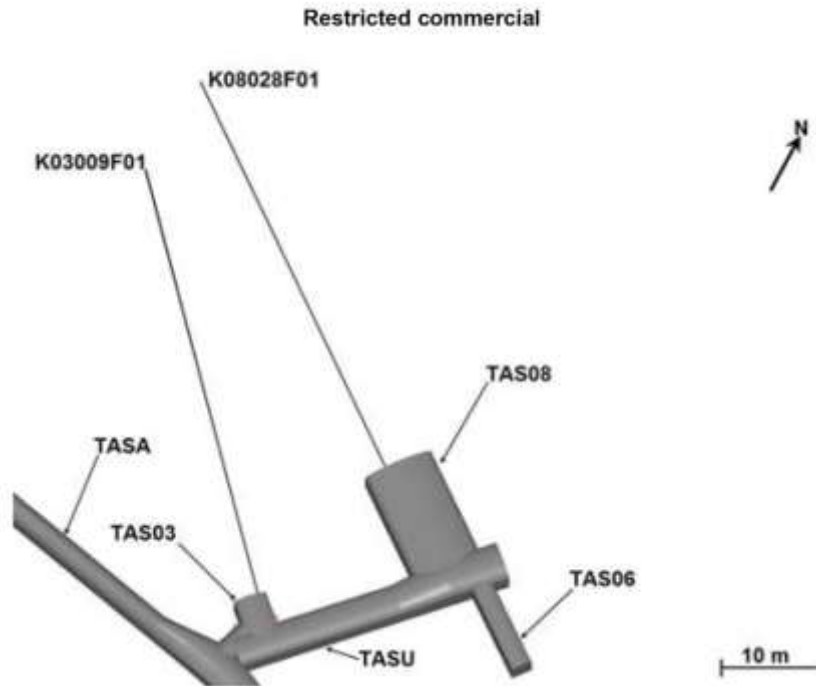


図4-19. エスポHRLのTASUサービス坑道を示す概略図。KBS-3Hの実験横坑TAS08とニッチDETUM-1<sup>1</sup>がつながっている。K08028F01は新規KBS-3Hボアホールである。

KBS-3H設計では、長さが300 mで、わずかに上向きに傾斜した水平定置横坑（直径1.85 m）が使用される。この横坑には厳格な要件（表4-5）が設定されており、その建設に提案されている手法は、76 mmのコアドリルを用いてパイロット孔を掘削し、その後に所定の横坑直径が成立するまで段階的に孔を拡張するものである。このためKBS-3H設計では、76 mmパイロット孔のコアドリル掘削の精度に高度に要求が設けられており、操縦を伴うドリル掘削の使用が求められる。さらにこの操縦を伴うコアドリル掘削では、岩盤内のボアホールの位置を測定できるように、精度の高い偏差測定が用いられる。複数の供給業者がボアホール調査のための市販ツールを提供している。しかしこれらには、作成されたデータの品質の検証が困難であるという固有の問題がある。これは、ボアホールが岩盤内にあるため、測地管理に用いる独立した孔は利用できないという単純な理由によるものである。

<sup>1</sup> 「詳細調査方法：SKB社の研究及びモデル化プログラム」(Vidareutveckling av metoder, verktyg och detaljerat program för undersökningar och modellering inför byggstart)。

表4-5. KBS-3Hの横坑要件。

傾斜	2±1°
局所的な傾斜	>1°
鉛直方向の局所的な移動偏差	6 mに対して±10 mm
方位角（水平）方向の局所的な移動偏差	6 mに対して±20 mm *
300 mボアホールに対する最大水平偏差	±2 m
直径	1,850+5

\* ドリル掘削の時点では6 mに対して±50 mmが要件となると考えられていたが、後にこれが間違っていることが判明し、6 mに対して±20 mmへと変更された。

SKB社は以前に、それぞれの孔の測定のために異なる測定方法を用いることにより、この問題に対処している。これによって状況は改善されるものの、全面的な対応が可能になっているわけではない。このためSKB社は、データ品質の評価を改善するために、エスポHRLに長さ300 mの較正施設を設けた。この施設は、基本的に地上にある1本の管で構成され、この管において、内部での偏差ツールを用いた測定に先立ち、その真の位置を明らかにするための測地調査を外部から行うことができる。エスポの偏差制御施設については文献 [Nilsson 2015] のセクション4.2でさらに詳しく検討されている。

エスポ施設でのドリル掘削に先立っていくつかのツールの精度試験が行われ、KBS-3Hのドリル掘削作業には磁気ツールとジャイロ・ベースのツールの両方を組み合わせたものを使用するという結論が示されている (Nilsson 2015)。

#### 操縦を伴うコアドリル掘削：K03009F01における予備試験

コア孔K03009F01 (図5-8) は、KBS-3Hボアホールに先立ってドリル掘削され、きわめて精度の高い操縦装置の適用試験が行われた。これらの試験により、必要とされるきわめて高精度の操縦動作が可能であることが確認されたほか、偏差ツールの測定が可能であるという結果が示されている。より一般的な用途では1°単位の操縦が適用されるが、0.1°までの操縦が実行されている (Nilsson 2015)。

#### K08028F01のドリル掘削

ドリル掘削条件を最適化するために、正確な位置調整が行われたケーシングの設置と、装置、ドリル掘削サイト及びスタッフの選定などの一般的な準備に、多大な労力が払われた (Nilsson 2015)。こうした行われた準備は成果を上げ、操縦は (予定された100 mのうち) 65 mの地点までは必要とされなかった。長さ63 mの地点で、偏差は右側に12 cm、下側に4 cmであった。これは実施された戦略に従って操縦を行うことになっていた誤差の約

半分であった。ボアホールが右に偏り続けた場合、後で操縦を伴うドリル掘削を行わなければならないリスクが高まるが、ボアホールの末端に近すぎる位置で行う場合には、その評価は困難になる。こうした条件に基づき、この時点で最初の操縦動作が行われた (Nilsson 2015)。

その効果は予想とおりであり、ボアホールは左に向いたが、それに伴って上方への傾斜が大きくなった。2回目の操縦は、傾斜の上昇を止め、左への移動を継続させるため、73 mの地点で行われた。この作業は成功を収め、傾斜の上昇は遅くなり、円滑な左への旋回が達成され、ボアホールはほぼ真っ直ぐに目標に向かった (Nilsson 2015)。

#### K08028F01における成果

図4-20に、ドリル掘削の結果を方位角 (水平方向) と傾斜によって示した。KBS-3H要件に照らしたデータの評価により、傾斜の偏差は最大で $-2.2 \text{ mm}/6 \text{ m}$  ( $\pm 10 \text{ mm}/6 \text{ m}$ が許容される)、方位角の偏差は最大で $-3.5 \text{ mm}/6 \text{ m}$  ( $\pm 50 \text{ mm}/6 \text{ m}$ が許容される) であるという結論が示されている (Nilsson 2015)。

この結果は明らかに長さ100 mのスケールでKBS-3Hに関する幾何学的要件が満たされることを実証するものであった。またこれにより、ONKALOの300 m地点を対象とする次のステップに進む上で必要な経験及び戦略がもたらされた (セクション4.8.6)。

ドリル掘削作業の後で、諸要件の再検討がなされ、方位角要件に誤りがあり、 $\pm 50 \text{ mm}/6 \text{ m}$ は誤りであり、定置時にスーパーコンテナが壁と衝突するリスクがあることが明らかになった。再計算により、新たに厳格な要件 ( $\pm 20 \text{ mm}/6 \text{ m}$ ) が設定された。しかしこのより厳格な要件も、エスポで履行されている。

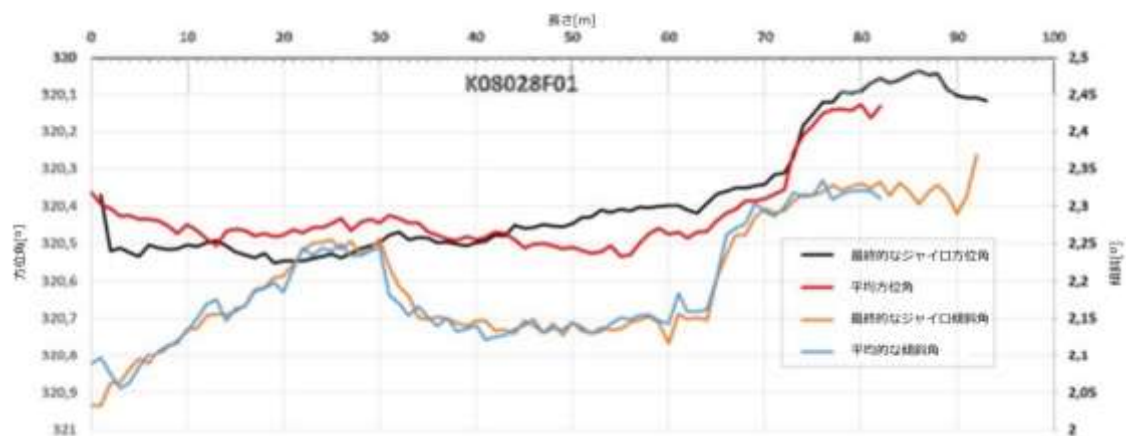


図4-20. K08028F01内での反射ジャイロと平均計算されたファイルを用いた最終偏差測定 (方位角及び傾斜) (文献 [Nilsson 2015] の図9-3)。

これまでのセクションの焦点は、KBS-3Hにとっての焦点となるドリル掘削作業の幾何学的な側面に合わせられていた。しかしボアホールK08028F01 (及び隣接するK03009F01) もサイト特性調査のさまざまな要素の対象とされており、その中には、音響型孔壁画像検層



装置を用いたボアホール・イメージング、指向性ボアホール・レーダー、BIPSボアホール・イメージング (Gustafsson 2015)、Boremapシステム (Sigurdsson 2015) を用いたコア検層、ボアホール物理検層 (Tiensuu et al 2015)、ポシヴァ社の流動検層 (Komulainen and Pöllänen 2015)、クロスホール干渉試験 (Hjerne et al 2015) が含まれる。K08028F01のドリル掘削中の計装を施したK03009F01において生じた圧力反応と、その後の緩衝試験の併用により、それぞれ19～29 m、30～32 m、37～39 m及び84～94.39 mの4つの流動区画が効果的に特定されている。実施された緩衝試験から、これらの構造の定常状態の透水量係数がそれぞれ $2.6E-09$ 、 $1.8E-07$ 、 $3.8E-8$ 及び $1.7E-9$   $m^2/s$ に設定されている。

言及した調査に加えて、目標を絞ったクロスホール抵抗率 (mise-a-la-masse法を含む) と3次元地震調査が行われた。この中には坑道とボアホールの両方に設置された発生源及びアレイが含まれ、その目的は、大規模構造及び亀裂(「重要構造」(critical structures)とも呼ばれている)の特定及び定量化に用いるさまざまな方法の試験及び評価に置かれており、定置孔位置におけるこれらが無いことは技術設計面での重要な要件の1つとなっている。

#### 4.8.6 ONKALOにおける操縦を伴うコアドリル掘削

諸要件に適合したKBS-3H横坑のドリル掘削が可能であることの実証作業の次のステップは、ONKALO (ONK-PH28) における300 mにわたるドリル掘削作業であった (Posiva 2016j)。

ボアホールONK-PH28は、後に車両接続路が掘削される予定の岩体の地球科学特性調査の拠点として利用されることになっているパイロット孔である。したがってその目的は、横置き定置横坑のパイロット・ボアホールの掘削を主な目的とするエスポにおける操縦を伴うボアホールK08028F01のドリル掘削のそれとは異なっている (Nilsson 2015)。図4-21に、ONKALO施設におけるボアホールの位置を示した。

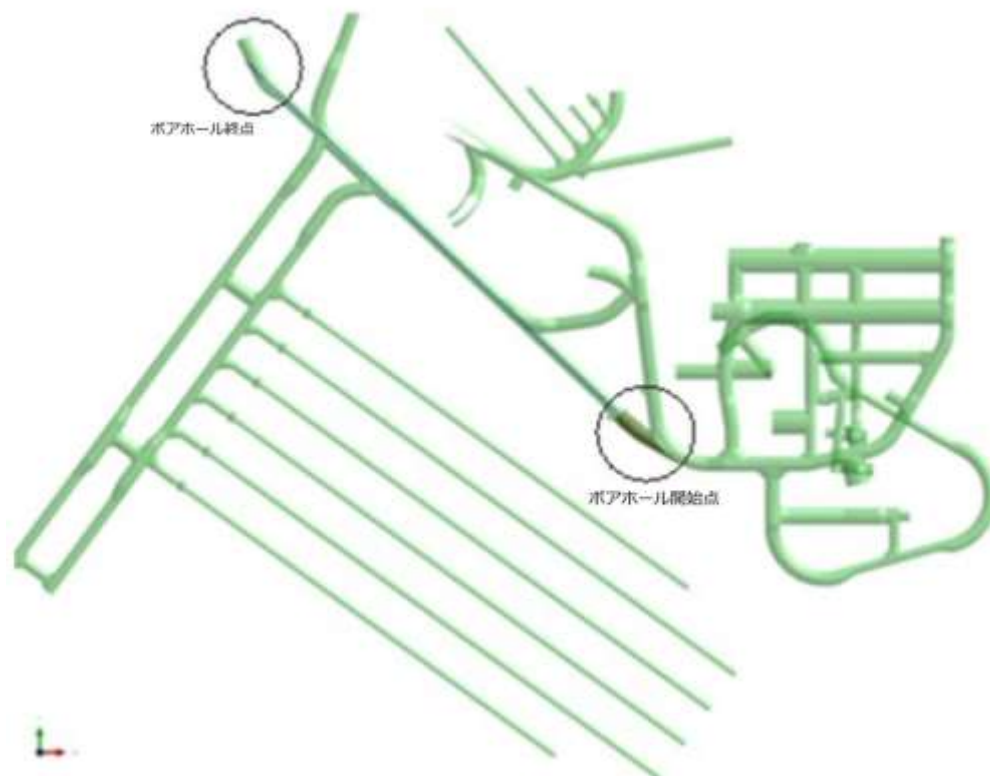


図4-21. ONKALO内のONK-PH28パイロット孔の全体的な位置。開始位置と終了位置は黒い円で示した。将来の定置坑道の位置は図の左下に示されている。

ボアホールONK-PH28の性能の前提条件は、ドリル掘削が、KBS-3Hプロジェクトのボアホール要件に従い、さらにはパイロット・ボアホールに関するポシヴァ社の要件（坑道縦断面が0.5 mの余裕の範囲に収まっていなければならない）を遵守して行われることであった。これに加えて、このケースにおいて坑道縦断面は、理論的には実際に予定されているより大きな坑道内に設置されるKBS-3V定置坑道に対応している。この両方の要請に対応するため、これらを併せて1つの要件の組み合わせが設定された。実際面でこれは、局所的に適用されるKBS-3H要件と組み合わせられてはいるものの、KBS-3Vのドリル掘削境界によって基本要件が定められることを意味していた（表4-5を参照）。

#### ONK-PH28のドリル掘削

ONKALOでは、エスポで使用されたものと同じ偏差測定装置とドリル掘削戦略（境界要件が修正されたもの）が採用された。またこの偏差ツールは、ドリルビットを通じてポンプ注入される磁気ツールを追加することによって補完された。

時間的な制約から、エスポで採用されたケーシングの設置手順を完全に実施することはできなかった。ケーシングの設置が完了した後、ジャイロを用いた最初の偏差測定が行われる前に、Nサイズ（75.8 mm）から10.23 mへのコアドリル掘削が実施された。当初の結果により、開始時の傾斜が、測地測定（値は2.0°を示した）とケーシング内部でのジャイロ測定（1.82°を示した）とで異なっていることが明らかになった。その上、傾斜が9 mにおいて

1.45°まで低下し続けたことから、ドリル掘削戦略に従って規定された限度の超過が生じ、上方への操縦を即座に開始しなければならなかった。

そのために、エスポで実施されたものと同様な操縦設定が使用された。しかし葉状花崗岩が強い自然の下方傾向を示して操縦に抵抗したため、傾斜面でほとんど効果が発揮されなかった。3回の施行後、傾斜は深度25.55 mにおいて1.59°まで拡大する可能性があった。

先に進むために、ボアホールONK-PH28では合計で25回の操縦セクションを実施しなければならなかった。先に述べたように、物理的な岩盤特性（硬度、不連続部分の幾何学的形状、葉状化）の影響により、ボアホールは規定された経路から逸脱する傾向を示した。ボアホールONK-PH28では、ボアホールのこの自然の偏差/逸脱が原因となり、適切な教訓を学び取るまでに、何度も慎重な操縦を行う必要があった。エスポの岩石学的性質と比べると、ONKALOの片麻状の岩盤は一般により高度な操縦設定が必要になる。ドリル掘削と操縦作業の詳細については文献 [Posiva 2016j] を参照のこと。

### ONK-PH28の結果

図4-22に、ドリル掘削の結果を方位角（水平方向）と傾斜を用いて示した。KBS-3H要件に照らしたデータ評価により、傾斜の偏差は最大で+8.0 mm/6 m（±10 mm/6 mが許容される）、方位角の偏差は最大で-8.2 mm/6 m（±20 mm/6 mが許容される）であるという結論が示されている（Posiva 2016j）。この結果は、長さ300 mのスケールにおいてKBS-3Hの幾何学的な要件が満たされることを明示するものである。これはKBS-3H設計に関して残っていた大きな課題の1つであったことから、当該目標の達成はこの設計にとって大きな一歩である。

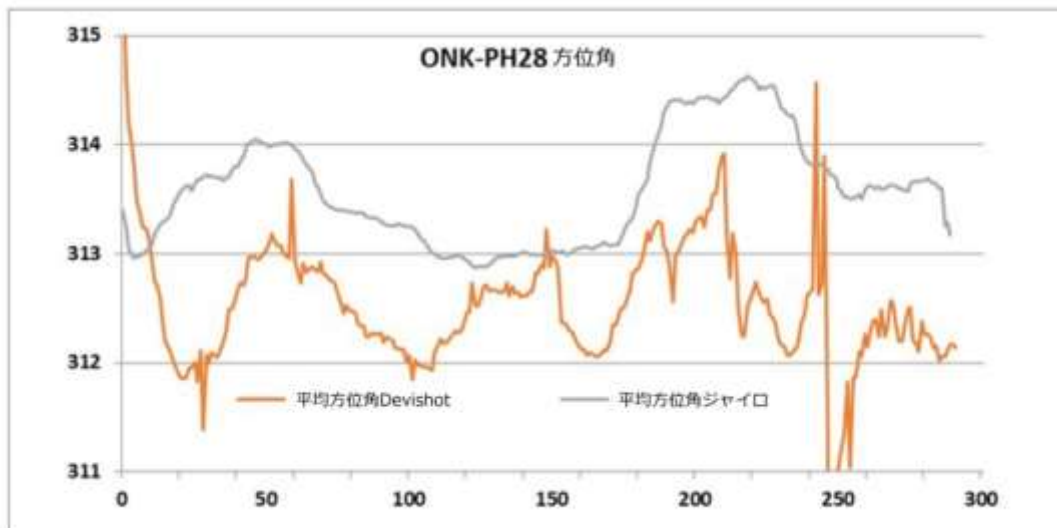
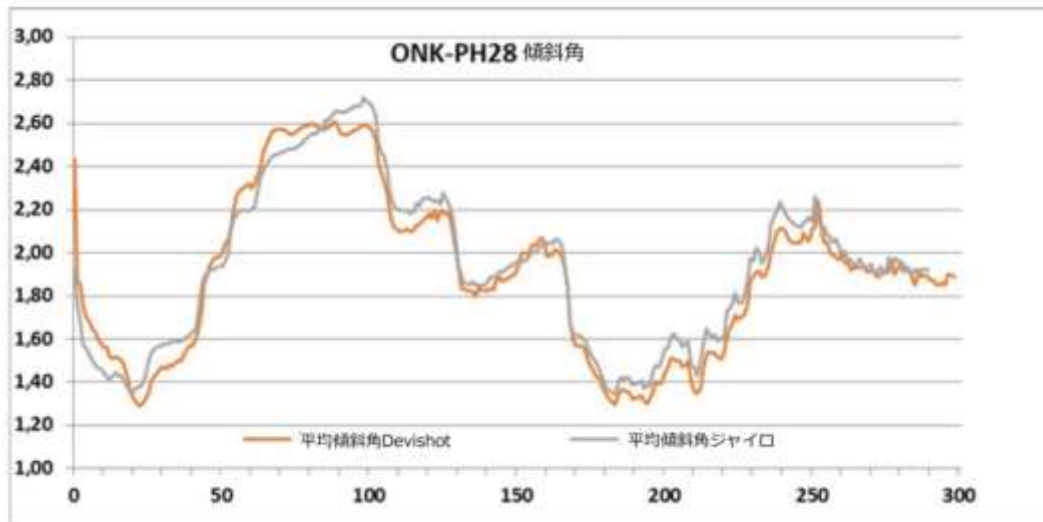


図4-22. ONK-PH28での反射ジャイロとDevishotを用いた最終偏差の測定（方位角と傾斜）。ONKALO施設で支配的な岩型の一部には磁鉄鉱が含まれており、このことが磁気に基づくDevishotデータに擾乱が見られる理由となっている。

#### 4.8.7 スーパーコンテナを用いたヒーター試験

本報告書の執筆時に、加熱を伴うスーパーコンテナ試験装置の解体作業が進められている段階であるが、以下の部分では、いくつかの予備的データを交え、このトピックについて紹介する。

初期のKBS-3H試験（スケール試験又は実規模試験）で、キャニスタの加熱を伴うものは1つもない。しかしKBS-3V以降は、試験とモデル化の両面で加熱条件のもとでの広範な経験が入手されている。最近の作業は、BUSTERプロジェクト（Johannesson et al. 2014）及びBÅTプロジェクトの枠内で実施されたものである。KBS-3Vに関する結果により、キャニスタから放出される熱により、キャニスタを取り巻く緩衝材ブロック内の水の再分配が生じ、それに伴う局所的な乾燥により一定期間を経て緩衝材に割れが生じる可能性があることが確認されている。

KBS-3H設計は、いくつかの面でKBS-3Vのそれと異なっているが、緩衝材内の水の再分配に関する問題は、KBS-3H設計の場合にも潜在的な問題となり得るという結論が示されている。KBS-3H緩衝材に割れが生じることにより、スーパーコンテナの健全性がリスクにさらされ、これが緩衝材の喪失にもつながる可能性もある。緩衝材の崩落も、運搬、定置及びDAWE排気プロセスの妨げとなる可能性がある。

KBS-3Hに関して割れの問題が最初に生じる可能性があるのは、定置活動に先立ってスーパーコンテナを貯蔵場に補完する必要がある場合であるが、SKB社の現行設計では貯蔵が可能な期間は最長で10日間である。その次に、定置後のコンパートメントへの給水に先立つ期間に割れが起きる可能性がある。この期間は、現行設計において、最初のスーパーコンテナが横坑内に定置されてから同様に最長で10日となる。したがってSKB社にとっての最大リスク期間は $10+10=20$ 日間となる。この点に関して、ポシヴァ社の現行KBS-3Hレファレンス設計の場合には、組み立て直後に定置が行われることになっているため、当該リスク期間は定置から10日間となることに注意するべきであろう。

貯蔵及び設置時の緩衝材の乾燥がどの程度まで大きな問題となる可能性があるのかを明らかにするための実規模試験が行われた。図4-23に、この試験の基本的な要点を示した。この図では、定置前の貯蔵及び横坑内にある状態のシミュレーションとして、スーパーコンテナが運搬用チューブ内に収容されている。

「加熱スーパーコンテナ」試験では、含水率を $14\pm 1\%$ に変更した緩衝材設計の試験も行われる。組み立て作業が行われる場所の相対湿度については、現行レファレンス設計（リングが11%、固形ブロックが17%）の条件よりも、含水率が統一された条件の方が望ましい。

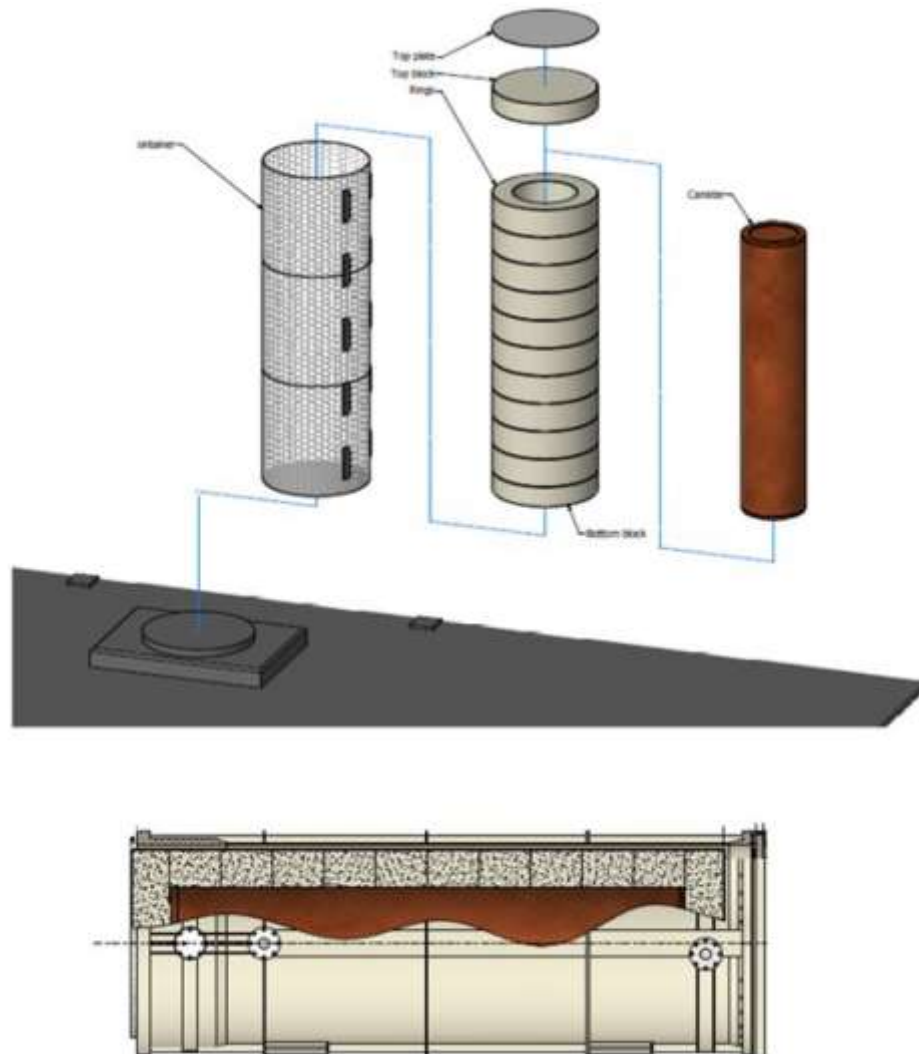


図4-23. 「加熱スーパーコンテナ」試験の基本概略図。上の図はスーパーコンテナの組み立てを、下の図は横置きでシーリングされた運搬用チューブに収容されたスーパーコンテナを示している。

#### 事前モデル化

試験に先立ち、その成果を予測し、計装計画を支援する目的で、事前モデル化が行われた。この事前モデル化では、キャニスタの初期温度が40℃を下回っている場合には、割れはごくわずかししか生じないものと予測された。キャニスタの初期温度が80℃の場合、運搬用チューブ内で10日間経過した時点の割れの深さは緩衝材リングで約1 cmと予測されている。KBS-3H処分場の組み立て作業場の設計はまだ作成されていないため、現時点では正確な温度を定義することはできない。本試験においてキャニスタは事前に約60℃まで加熱されたが、組み立ての日にほぼ20℃低下した（組み立て時にヒーターの接続を切らなければならなかったため）。

またこのモデルにより、内部乾燥が、内部の隙間と外部の隙間との間に空気の流動経路が存在するかどうか大きく左右されることが示されている。こうした隙間の間に何らかの漏出経路（すなわちブロック間の空気の経路）があれば、それにより乾燥が促進されるため、

割れ作用も増大することになる。使用されたモデルでは、非対称の熱分布によって生じる可能性のある熱応力は考慮に入られていない。

またこのモデルでは、シミュレーション対象となった期間にわたり、スーパーコンテナの周囲に比較的低温の低い「岩盤」表面がある横坑内では、ブロック内の含水率の分布に大きな変化は生じないものと予測された。すなわちこのモデル化によれば、10日間でブロック内の含水率プロファイルにさほどの変化は生じない。

### 組み立て及び試験期間

9月19日に組み立てが開始され、その日のうちに底部ブロックと10個のリング全てを設置することができた（図4-24）。少数のブロックにいくつかの比較的小規模な運搬時の損傷が見つかり、記録されたが、全体としてブロックは良好な形状を維持しており、持ち上げに真空式の装置を使用することに何の問題もなかった。

26日に高温のキャニスタが設置され、スーパーコンテナが横向きにされた。9月27日にセンサーが接続された。

図4-25に、5番目のリングの温度センサーから得られた予備的なデータを示した。この図から、センサーが接続された時点ですでにベントナイトはきわめて高い温度に加熱されていることが見て取れる。また横向きにされたキャニスタの下側が、最高温度である59℃を示し、最も高温となっていることも明らかである。試験期間中に温度の均一化が進み、試験装置での平衡状態が確立されているように見られる。10月4日にわずかな温度上昇が起きているが、その理由は現在のところ説明できておらず、さらなる評価を行う必要がある。



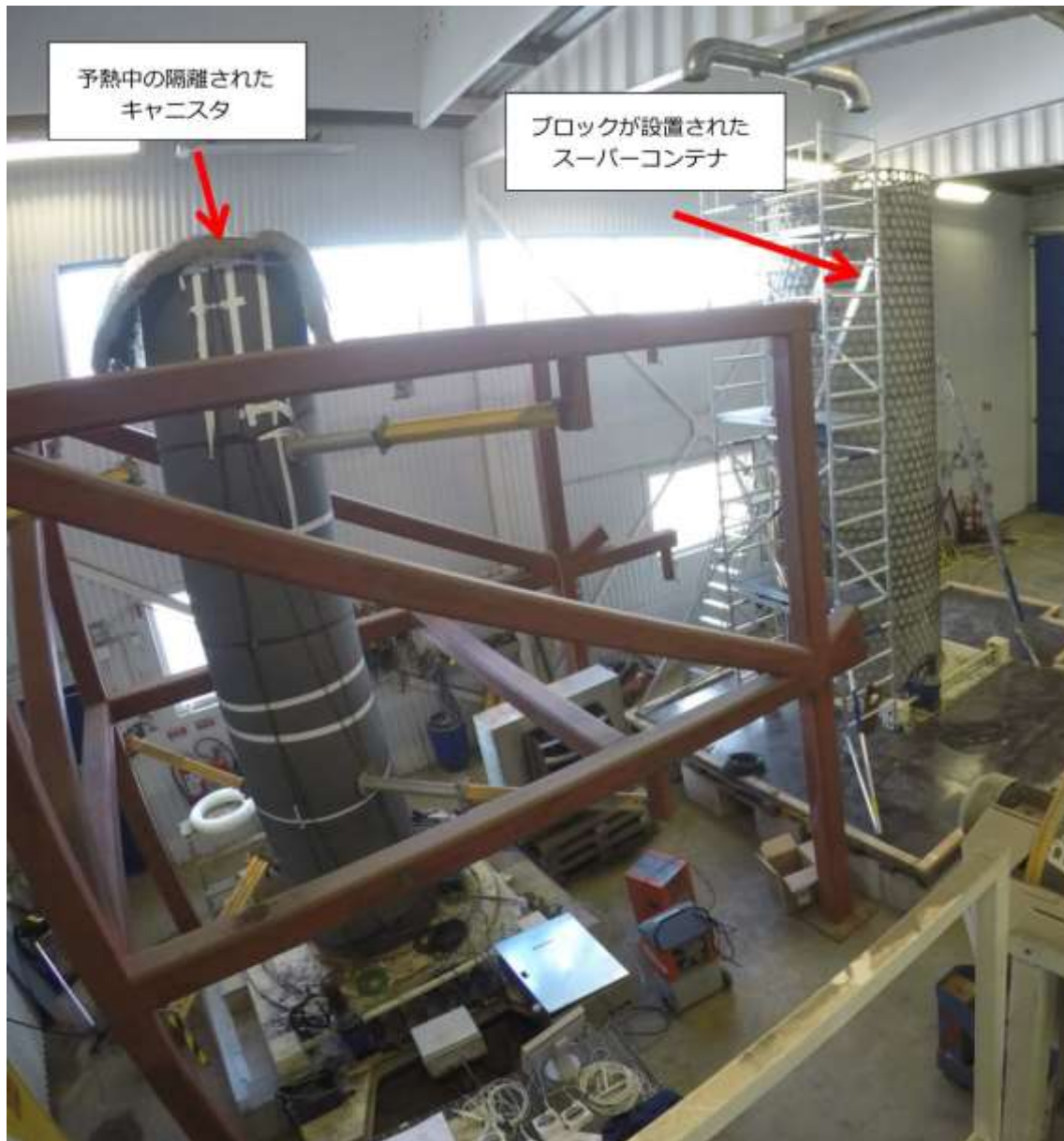


図4-24. 全てのリングが設置された後の組み立て施設の様子を示す写真。

10月6日に冷却段階が開始されたが、プラスチック・テントによる冷却は意図されたようには機能しなかった。結局のところこの試験は基本的に20日間にわたる貯蔵条件のもとで実施され、運搬用チューブのセンサーにおいて温度冷却効果はごくわずかしか見られなかった。今後、こうして冷却が失敗したことがどのような意味合いを持つのかの評価を行わなければならないが、モデル化において、横坑条件をシミュレーションした比較的温度の低い条件からはごくわずかな効果しか生じないと予測されていたことから、この意味合いはきわめて限定的なものであるはずである。

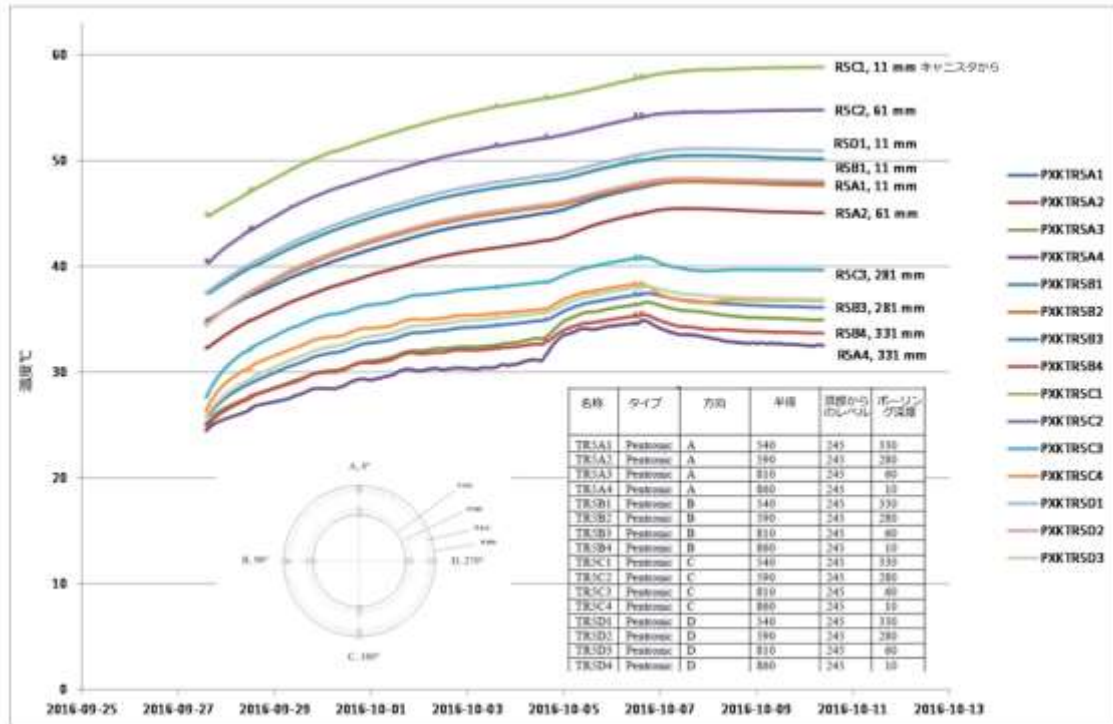


図4-25. リング5の温度。



図4-26. スーパーコンテナ・リングの1つのサンプリングの様子。リング内の含水率の再分布の測定のため、ベントナイトの薄片が切り取られた後、より小さな断片に分けられた。

## 解体及び解析

10+10日が経過した後、スーパーコンテナが再び立てられ、サンプリングが実施された。モニタリング時に緩んだベントナイトが全て集められ、その重量は約2.5 kgとなった。本報告書の執筆時にはまだデータの評価は行われていないが、密度の面から見て2.5 kgという質量喪失は問題とはならないはずであり、横坑シナリオにおいて構成要素の下での排水経路の目詰まりの問題はおそらく生じないと考えられる。

これらのデータは編集及び解析を経て、2017年春に発表される予定である。

## 4.9 長期安全性に関する研究

現行プロジェクト・フェーズにおいて、長期安全性に関するさまざまな研究が実施されている。以下の部分で、これらの研究の一部の概要を示す。

### 4.9.1 岩盤せん断がキャニスタに及ぼす影響

KBS-3H定置横坑と交差する既存の亀裂が地震によって活性化し、せん断作用が生じる可能性がある。この種の岩盤せん断の効果については、文献 [Börgesson & Hernelind 2016] において、Abaqusコードを用いた有限要素計算による調査が実施されている。定置横坑内でキャニスタを取り巻く緩衝材は、キャニスタと岩盤との間のクッションとして作用し、岩盤せん断によってキャニスタにかかる力を著しく低減する。緩衝材の密度を低くすると、物質は比較的軟らかいものとなり、キャニスタへの力は低減される。しかし処分場では緩衝材に高い密度が求められるため、緩衝材の剛性はどちらかといえば高く、キャニスタにある程度大きな力が伝わる可能性がある。せん断率が高まることにより剛性も高まり、このことは、せん断率がきわめて高い場合、キャニスタにかなりの損傷が生じる可能性があることを意味する。

KBS-3Vにおける定置孔を通じた岩盤せん断が及ぼす効果については、『SR-Site』で広範に調査されており、その結果は文献 [Hernelind 2010] に報告されている。同文書で報告されている作業の目的は、応力移転面での最悪のケースの一部をモデル化し、KBS-3H及びKBS-3Vの幾何学的形状に関して得られた結果の比較を行うことであった。モデル化の基礎としてKBS-3Vの有限要素モデルが用いられたが、KBS-3Hに関しては幾何学的形状がその幾何学的配置に合わせて変更され、スーパーコンテナも含められている。以前にKBS-3Vに関して特定された最悪ケースの1つがKBS-3Hに条件のもとでモデル化され、結果の比較が行われた。これに加えて、スキュー角での圧縮せん断のケースのモデル化も行われている。KBS-3Vでは起こりうるケースと見なされなかったため、KBS-3Vに関するスキュー角での圧縮せん断のケースのモデル化は行われていなかったが、KBS-3Hのケースでは起こり得るものと見なされた。

KBS-3Hと交差する岩盤せん断の最も過酷なケースの1つを対象に行われたモデル化の結論は、KBS-3HとKBS-3Vという処分場設計代替策の間の岩盤せん断の影響の相違は、同タイプのせん断であれば取るに足らないものだというものである。またこの2つのモデルの相違に関する不確実性の影響も取るに足らないものだという結論も示された。このことは、

KBS-3Vにおける岩盤せん断に関して行われている広範な調査及びモデル化作業の結果及び結論が、KBS-3Hにも適用可能であることを意味している。

スキュー圧縮せん断に関する第2の計算については、蓋の溶接部の応力は、KBS-3Vに関してモデル化された全てのケースにおける当該応力を上回っていた。KBS-3Hに関して完全なセーフティケース（シナリオ解析を含む）を作成する際には、この点を考慮に入れる必要がある。

#### 4.9.2 化学的浸食

「化学的浸食」という用語は、低イオン強度条件下での粘土物質の喪失を意味する。ポシヴァ社及びSKB社が最近実施したKBS-3V処分場に関する安全評価（それぞれ文献 [TURVA-2012] 及び [SR-Site] を参照）では、温帯気候条件のもとでの天水の浸潤により、あるいは（特に退氷と結び付く）氷河融水の侵入により緩衝材と埋め戻し材の物質喪失が起こる可能性が検討された。これらの評価では、著しい緩衝材の浸食は見込まれないが、少なくとも現時点では、定置孔の一部についてはその可能性を排除することはできないという結論が示されている（たとえば、文献 [Posiva 2013pa] の表8-1を参照）。以前のKBS-3Hフェーズ（「補完的研究」）において、この化学的浸食がKBS-3H処分場システムに著しい影響を及ぼす可能性があるため、次のプロジェクト・フェーズで対処するよう求める提言が示されている（文献 [SKB 2012] のセクション5.9を参照）。

図4-27に示したように、傾斜角の範囲内で亀裂内に押し出されるベントナイト緩衝材に生じうる浸食挙動のシミュレーションを行うために、一連の小スケールかつ流水式の人工亀裂実験が実施されている（Schatz & Akhanoba 2016）。

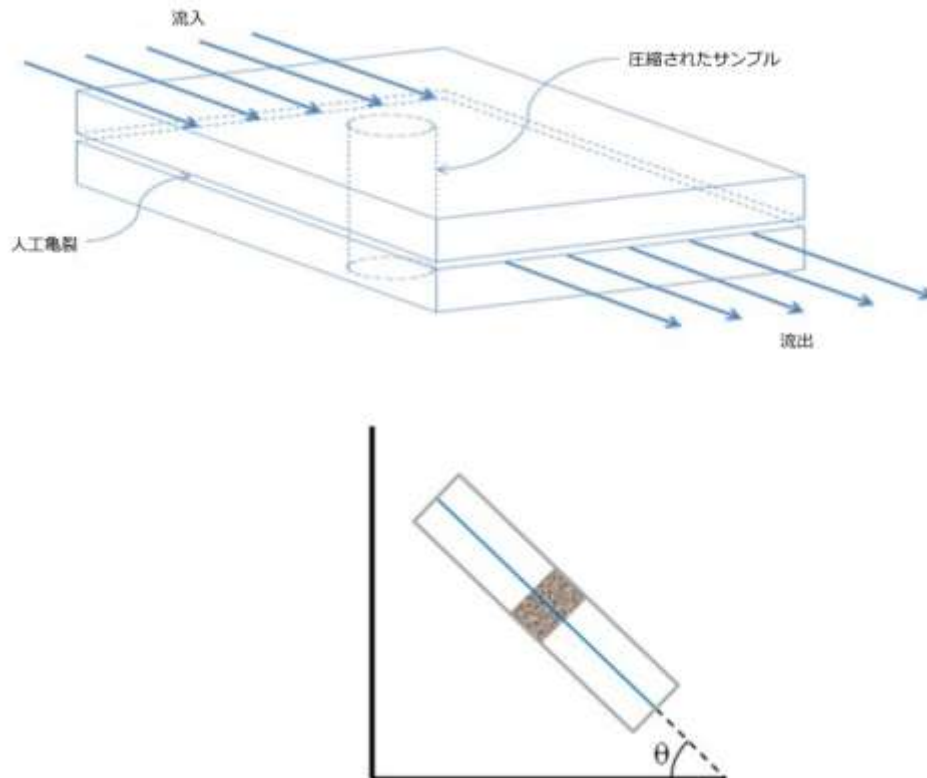


図4-27. 上の図：流水式実験装置。下の図：大きな傾斜角 ( $\theta \geq 45^\circ$ ) での試験システムの配置。

この実験は、特注設計の小スケールの流水式人工亀裂セルを用いて行われた。圧縮されたサンプルが人工亀裂セル内に置かれ、溶液の流入を開始する前に当該系に厳格なシーリングが施された。変化させたパラメータは次のとおりである。

- 緩衝材の組成。
- 地下水の組成。
- 地下水の速度。
- 亀裂の開口径及び傾斜。及び
- 模擬的な副成分鉱物の量。

水平方向の亀裂に関する試験結果の詳細は文献 [Schatz et al. 2013] で記述されており、また水平ではない亀裂に関する試験の詳細は文献 [Schatz & Akhanoba 2016] に報告されている。いずれのケースでも、質量喪失が観察された試験と観察されなかった試験との間に明確な違いが観察されている。特に次に挙げるケースでは、持続的な浸食は全く観察されなかった。

- カルシウム交換モンモリロナイトの場合（中間的な層間サイト上ではカルシウムが約90%を上回る）。
- その他の緩衝材組成において、溶液中の総陽イオン電荷濃度が十分に高い場合。

質量喪失が起きるしきい値となる溶液中の陽イオン電荷濃度は、ある程度まで溶液中の陽イオンの価数に依存することが分かった（後述）。しかしその他の要素（亀裂角度、地下

水速度など)には依存しないように思われる。

#### 4.10 長期安全性評価

ポシヴァ社のオルキルオト・サイトで、KBS-3Hに関する長期安全性評価が実施されている。「システム設計」プロジェクト・フェーズでは現在、次に挙げる主な安全評価報告書が作成されているところである。

- 『設計基準』。
- 『処分システムの記述』。
- 『特徴、事象及びプロセス』。
- 『性能評価』。

この活動の焦点は、規制規準に示された安全評価を提出することを目的に、さらにはKBS-3概念の2つの設計案の比較のために信頼できる情報を提示することを目的に、KBS-3H設計の長期性能と長期安全性への影響に関する知識の開発を十分な詳細さのレベルまで進めることにある。主な相違点は、定置横坑に、さらには定置横坑に定置される構成要素に関するものである。問題の多くはKBS-3Vの場合と類似したものであり、KBS-3H安全評価では、『SR-Site』(SKB 2011)とポシヴァ社のKBS-3Vに関するセーフティケース『TURVA-2012』(Posiva 2012b)に示された結果が考慮に入れられた。

最近のKBS-3Vセーフティケース/安全評価に加えて、2007～2008年以降に行われた設計、レイアウト、スーパーコンテナの材料に関する変更やその他の変更を考慮に入れた上で、KBS-3Hを対象に実施された最初の長期安全評価の結果 (Smith et al. 2007) が可能な範囲で利用された。

安全評価作業では現在、最後のとりまとめ作業が進められているところであり、2017年春には作業の成果が発表される予定である。

#### 4.11 環境面での影響

2004～2007年のKBS-3Hの「実証」プロジェクト・フェーズにおいて、予備研究 (Autio et al. 2007) が行われた。この研究では、KBS-3V処分概念の対応する負荷との比較の試みなど、KBS-3H処分場が環境に与える負荷に寄与するさまざまな側面が取り扱われている。検討された側面として、土地利用、騒音、空中への放出、水中への放出 (地表水)、地下水への効果、資源の消費、岩盤、粘土、コンクリート、鋼鉄及び鉄、爆発物の消費、グラウチング材、エネルギー、装置の必要性、廃棄物の発生などが挙げられる (Autio et al. 2008)。

将来必要となると予測される作業には、以前に実視された試験的な比較を現在のより成熟したKBS-3Hバリエーションを用いて更新することが含まれる。また淡水の消費が、以前に研究されたリストに含められるべきである。時の経過と共にKBS-3Hを採用する利点がどのように失われてゆくのかを明らかにするために、将来施設の操業が開始された後にKBS-3VをKBS-3Hバリエーションに変更する代替策が取り扱われるべきである。

また今後の研究では、材料の選定と処分場の建設が環境面で及ぼす影響を最小限に抑える方法が取り扱われるべきである。

#### 4.12 操業安全性と職業安全

##### 操業安全性

2010年から、KBS-3H処分場の操業安全性を取り扱う「KBS-3H操業安全性」活動が行われている。この活動には、a) 横坑の準備、b) 積み替え施設、そしてc) 定置（DAWE手順を含む）に関連するさまざまな活動に関する「what-if」分析が含まれる。

次に挙げる文書により、補足的な情報を入手することができる。

- Lucoex MPT実験に関しては、VTTが作成した定置装置に関する最近のより包括的なリスク解析（3文書）。
- Lucoex MPT実験に関する最終報告書（Gugala et al 2015）。
- ボアホールK08028F01の操縦を伴うドリル掘削についてまとめた報告書（Nilsson 2015）。

#### 4.13 職業安全

2011年初めに提出された1件研究の焦点は、KBS-3H定置作業（DAWE概念も含む）のそれぞれの操業ステップで発生しうる個人的な安全リスク、いわゆる「計画停止要因」を特定することに合わせられていた。提示されたリスク解析では、KBS-3HとKBS-3Vのリスク・シナリオの違いも強調されている。

生じうるリスクの主な原因は、閉じた空間内での作業に関連している。

1. 横坑準備時に岩石や石の落下が生じるリスク。
2. 定置横坑内での火災。
3. アーク溶接中の窒息リスク。
4. 粉塵。
5. 照明の喪失。
6. 高い騒音レベル。

特定された不確実性の多くは、定置横坑内にプラグを設置する際の溶接作業に関わるものであった。操業及び職業安全の両方の観点から長期安全規準を達成するために、これらの側面をより詳細に調査することが提言されている。その結果として、関連する最も重要な物理障壁は換気システムである。閉じた空間における溶接の影響を含め、操業システムの寸法決定に関する調査をさらに進める必要がある。

#### 4.14 回収可能性及び逆向きの操業

回収可能性に関しては前回の「実証」フェーズで研究されており（Autio et al. 2008）、最近のプロジェクト・フェーズである「KBS-3Hシステム設計」における研究は少なくなっている。しかし全体像を把握するために、本セクションではその手法について簡略に説明すね。

次に挙げる考察に基づき、横坑内でのスーパーコンテナの処分又はその他の装置の設置の後、処分場の操業期間中のいかなる時点でも、定置された構成要素の横坑からの回収/撤去が可能であるべきだと考えられている。



- 定置時に深刻な誤りや事故が発生した場合に備えて、廃棄物処分プロセス自体が可逆的なものでなければならない。
- 定置作業中又は定置後にスーパーコンテナの故障が起きた結果として、スーパーコンテナの取り出しが必要になる可能性がある。
- 処分場が適切に機能しなかった場合に、スーパーコンテナの取り出しが必要になる可能性がある。
- フィンランドの許認可要件によって回収可能性が求められている。
- 将来の世代が、定置された物質の回収に関心を持つ可能性がある。

この点に関しては、「構成要素が水を吸収して膨潤を始める」又は「構成要素は損傷のない状態にあり、水による影響を受けない」という2つの主要シナリオが存在する。膨潤が起きないケースでは、人工湿潤化に先立ち、定置装置を逆向きに運転することが可能である（いわゆる「逆向きの操業」）。この点については、エスポHRLで模擬的なスーパーコンテナを用いた実証が成功している。

ベントナイト緩衝材が水を吸収しているケースでは、逆向きの操業は適切に機能しない可能性があるため、スーパーコンテナを取り出すために別の手段（すなわち回収）が必要になる。

定置横坑にはさまざまなバリア（構成要素/物質）が導入されることから、それらの撤去とキャニスタの最終的な回収のために、一定数の異なる手法が必要になる。

これらのバリア撤去のために提案されている手法には、次のものが含まれる。

- 横坑プラグの撤去。
- 充填材物質の撤去。
- 間隔ブロックと緩衝材物質の撤去。
- スーパーコンテナのエンドプレートの切断。
- スーパーコンテナ内部のベントナイトの撤去。
- キャニスタの撤去。
- 鋼鉄製シェルの撤去（スーパーコンテナ）。
- 横坑の清掃。

さまざまなバリアの撤去は、異なる手法の組み合わせを用いて実施される。コンクリート及びチタン製の構成要素は、ハイドロデモリッション法とウォーター・カッティング法を用いて撤去することが提案されている。ベントナイトの撤去は、流体力学/化学法を用いて実施できる。これらの方法はすでにKBS-3Vキャニスタの回収で試験済みである。あるいは、この場合にもハイドロデモリッション法を使用することが可能である。ただしこの場合、この方法が銅製キャニスタに損傷を与えないことを検証する試験を行っておく必要がある。

「実証」フェーズに実施された作業では、スーパーコンテナとその他の構成要素の設置後の撤去は可能だという結論が示されている。

KBS-3Hの回収可能性の一部の試験及び実証は、エスポHRLで「多目的試験」(MPT)装置の解体が行われる際に実施することができよう。

#### 4.15 費用の見積り

SKB社は現在、KBS-3H処分場の建設及び操業に要する費用の見積りに関する分析を行っている。KBS-3Vの費用との比較も行われている。KBS-3H概念の開発が成功する確率を考慮に入れた上で、いくつかの異なるシナリオが検討されている。これらのシナリオは、レファレンス概念をKBS-3VからKBS-3Hに変更する決定が行われるいくつかの異なるマイルストーンをカバーするものである。

予備的な結果は、横置き概念によって大幅な費用の節約が達成されるものの、KBS-3Hの開発にはまだ解決する必要がある問題が存在しているというものである。またレファレンス概念の変更が行われる時期も、節約される費用の大きさに重要な影響を及ぼすことになる。

## 5 今後行うべきKBS-3Hに関する開発作業

本章では、KBS-3H概念が実際の処分活動で使用できるようになるために行う必要のある開発作業について取り扱う。

将来行うべき作業には、KBS-3V概念と共通する問題もKBS-3Hに固有の問題も含まれている。

### 5.1 解決すべき共通問題

#### 5.1.1 化学的浸食

緩衝材及び充填材の構成要素の化学的浸食に関する問題は、「システム設計」フェーズに実施された長期安全性評価の主要な焦点の1つであった。KBS-3Vの場合もKBS-3Hの場合も化学的浸食が起きる可能性はあるが、結果として生じる緩衝材の物質再分配に関する懸念はKBS-3Hの場合の方が大きい。その理由として、横坑沿いの1ヵ所におけるベントナイト浸食がかなり重要なものである場合、直近のキャニスタの周囲における条件だけでなく、横坑沿いのその他のキャニスタの周囲の条件にも影響が及ぶ可能性があることが挙げられる（いわゆる「ドミノ効果」）。この点に関する研究は、KBS-3VとKBS-3Hの両方を検討する共同プロジェクトで継続される予定である。

#### 5.1.2 KBS-3HとKBS-3Vに共通するその他の問題

KBS-3VとKBS-3Hの両方にとって高い関連性を有する可能性のある問題がいくつか存在し、それらは将来、KBS-3Vプロジェクトの一部として研究される予定である。この中には次に挙げるものが含まれる。

- 均一化など、ベントナイトの挙動に関連する問題。
- 緩衝材に関する運搬及びその他の重要な特性に関するバウンディング・シナリオ。
- 別々のものであるが、同時に起きる可能性もある影響に関する考察（次のフェーズでシナリオ作成が行われる場合、その中に取り扱われる）。
- 使用されるサブモデル及び入力データに関する最新の検証及びベンチマーク（次のフェーズの『モデル及びデータ』報告書で取り扱われる）。

### 5.2 解決すべきKBS-3Hに固有の問題

#### 5.2.1 完全なセーフティケースの完成

フォルスマルク・サイトとオルキルオト・サイトを対象とした将来の作業として、包括的なセーフティケースを作成する作業が残っている。

#### 5.2.2 MPTの解体

「多目的試験」(MPT)は、レファレンス設計であるDAWE（排水、人工注水及び排気）の短縮版であり、加熱が取り除かれている。しかしこの試験には、試験前の横坑条件の特性調査、主なKBS-3H構成要素の設置とその後の当該システム変遷に関するモニタリング、さらにはシステムの最終的な解体及び評価が含まれている。モニタリング・システムは、圧力

(膨潤圧及び間隙圧)、湿度、温度、移動及び漏水を測定する複数のセンサーで構成される。

現在のプロジェクト・フェーズ後に残る作業は、MPT装置の解体である。KBS-3Hプロジェクトの最新研究である「Big Bertha」(BB)試験により、DAWEにおける緩衝材の膨潤及び均一化プロセスが予想と一致していないことが示されている。スーパーコンテナの周囲の水で満たされた隙間に向けた緩衝材の膨潤は予想よりもはるかにゆっくりしたものであり、その理由はまた十分に解明されていない。MPTの目標を確実に達成するためにその解体及び分析の時期を定義する最良の方法は、MPT条件のモニタリング結果の追跡を継続することである。解体時期の決定に関して価値ある入力情報の1つは、BB5試験の解体によって得られる。また解体及び分析に関して鍵となるパラメータと提案されたレベルを定義する文書の作成が、今後の作業として残っている。

### 5.2.3 BB5試験の解体

現在進められている第5「Big Bertha」試験(BB5)では、湿潤条件のもとにある横坑内のスーパーコンテナ横坑区画に関する、すなわち人工給水後に追加的な水へのアクセスが存在する状況に関するシミュレーションが行われている。BB5の主な目標は、DAWE設計に従って設置されたスーパーコンテナ横坑区画内の緩衝材の膨潤に関する調査を行うことにある。残存する空隙は、設置後に人為的に水で満たされている。ベントナイトは、試験開始時の人工給水の後にも、岩盤からの追加的な水の供給を受けている状態にある。この試験は長期試験であり、緩衝材の初期密度は、緩衝材の完全な均一化が成立した後の平均密度が実規模の場合とほぼ同じになるよう採用されている。

このBB5試験においてベントナイトの挙動に関して入手される情報、特に穿孔を伴うスーパーコンテナ・シェル内のベントナイトがその穿孔を通じてシェルと横坑壁との間の隙間に押し出される現象に関して入手される情報は、重要である。BB5試験の結果は、MPTの解体規準に関する文書の作成に当たり入力情報として使用される計画である。すでにMPTの解体作業は、より後のフェーズ、すなわち現在のプロジェクト・フェーズよりも将来に行われるフェーズに延期されている。

### 5.2.4 プラグの詳細設計

鋼鉄製コンパートメント・プラグの設計はすでに存在するほか、プラグの手作業による設置/組み立ては、いずれもエスポHRLにおいて、2008/2009年の冬とMPTで行われた試験で実証されている。

今後の課題となる作業として、チタン製のコンパートメント・プラグと横坑プラグの詳細設計が挙げられる。横坑プラグとコンパートメント・プラグの製造、設置及び組み立ての実行可能性を実証する必要もある。

横坑プラグの詳細設計のためには、過渡領域から横坑プラグに対する最大膨潤圧に関するより多くの入力データが必要とされている。計算により、プラグに対する最大膨潤圧は約2 MPaとなることが示されている。すでに終了したラボ試験(1:10)の結果は、算出された膨潤圧の下限値と一致していた。現在のところ、以前に想定された10 MPaの代わりに5 MPa

の値が、保守的な設計膨潤圧であると見なされている。

将来の設置作業は、遠隔操作機器と自動化装置を使用した溶接法を用いて実施される予定である。したがってその開発を行う必要がある。

### 5.2.5 スーパーコンテナの詳細設計

「システム設計」フェーズで想定されたスーパーコンテナ・シェルの材料はTiであったが、この物質は将来変更される可能性もある。その理由としては電解腐食シナリオに関して提起された、スーパーコンテナの内部の緩衝材が浸食によって失われる問題が挙げられる。この現象により、シェルとキャニスタが接触し、シェルの材料が銅よりも不活性度が高い場合（すなわちTiなどの場合）、キャニスタの電解腐食が発生する可能性が生じる。スーパーコンテナ内の緩衝材の排除に関して想定可能な唯一の原因は、化学的浸食である。したがってシェルの材料問題は、今後再検討されるべき課題として残っている。銅も材料候補の1つであるが、たとえばスーパーコンテナや横坑直径内の全ての下位構成要素の寸法などを考慮に入れた上で、TiからCu又はその他の材料候補（たとえば青銅の1種類であるネイビー・ブロンズなど）への変更に伴って生じる結果的影響の再評価を行わなければならない。

### 5.2.6 シリカゾルに関する研究

横坑構成要素の設置期間にわたり、充填ブロックの物理的浸食を回避するために、KBS-3H定置横坑のグラウチングが必要とされる。定置装置は、定置装置の部品を改良することにより、最大で約10L/分の水の流入に耐えられると見積もられている。したがってグラウチング後の横坑への総流入量は、この限度値を下回っているべきである。これを実現するために、特に流入量が大きい場合にはグラウチングが施されるべきであり、必要に応じて0.1 L/分を上回る流入量を示す全ての亀裂でグラウチングを実施するべきである。

メガ・パッカーのポストグラウチングに先立ち、たとえばメガ・パッカーによるグラウチングの成功に影響を及ぼす対圧、亀裂の開口径/T-値、流入速度及び地下水の化学的性質などとの関連において、処分場深度におけるグラウチング材の1つとしてのシリカゾル（コロイド状態のシリカ）の適用可能性と限界に関する我々の理解を深める研究が行われるべきである。

これに加えて、この研究で取り扱うべき問題として、これらの要素の大きな流入量に対するシーリングに及ぼす効果、どの程度の流入量であればグラウチングが可能なのか、必要とされる手続き上の行為などが挙げられる。上述した要素は、地下水の化学的性質を除き、基本的にジェネリックなものである。

将来的には、シリカゾルの長期的な挙動と、シリカゾル・コロイド及びベントナイトの浸食性に関する理解の向上も必要である。シリカゾルの力学特性やシリカゾルに影響を及ぼす環境的側面に関する理解も深める必要がある。

この研究により、KBS-3V設計への価値ある情報も得ることができよう。

### 5.2.7 処分場深度でのポストグラウチングの実証（横坑のリーミング後）

処分場深度でのメガ・パッカーによるシリカゾル（コロイド状シリカ）を用いたポストグラウチングに関する作業は、リーミング作業と共に将来に延期された。

メガ・パッカーによるシリカゾルを用いたポストグラウチングは、すでにエスポHRLの-220レベルでの試験が成功している（Eriksson & Lindström 2008）。しかしこの方法が処分場深度において、またそこで予想される条件のもとで、流入速度の上限値が成立する場合であっても機能することを実証する作業は、まだ残っている。

この実証の前提条件の1つは、横坑と交差し、一定範囲の流量率を伴う亀裂が存在する状況を実現することである。この横坑のための場所はすでにエスポHRLに用意されている。

### 5.2.8 耐食性の充填ブロック

横坑に設置される充填ブロック（他のブロックよりも浸食を起こしやすい傾向がある）に使用する耐食性材料の候補に関する活動が行われてきたが、現在この作業は、化学的浸食に関する十分な理解が得られるのを待って保留されている。

しかし計算により、充填ブロックを耐食性のものとすることができたとしても、移流条件にさらされるスーパーコンテナ位置の数が大幅に低減されないことが示されている（Smith et al. 2016）。

耐食性の充填ブロックの問題は、今後に対処すべき問題として残されている。

### 5.2.9 設計最適化の可能性

現在のプロジェクト・フェーズの結果は、KBS-3Hの現行DAWE設計が実施可能なものであることを示している。それと同時に、MPTの場合のように全てのステップを実規模で実行したことで、設計の強みと、追加的な検証が必要とされる技術的な解決策の両方がクローズアップされている。この種のトピックの1つとして、特に間隔ブロックに使用するためのフォークリフト・システムを開発する価値があるかどうかという問題が挙げられる。この種のフォークリフトが実現した場合、それによっておそらく定置装置の作業速度が増し、段階的なプロセスの採用を回避することができる。スーパーコンテナには依然として、現行のウォーター・クッション技術が必要となろう。

現時点でも機能することは明らかだが、さらなる最適化が必要だと思われるもう1つの設計として、排気システムに関するものが挙げられる。このシステムを排除することも可能ではあるが、その場合、横坑の設定に、したがって安全評価に大きな変更が生じることを意味する。解決策の1つとして、2本の坑道の間で横坑がリーミングされる二重坑道が挙げられよう。この点に関する検討は、KBS-3H基本設計の開発に先立って行われた。しかし基本設計となるBDでは、その利点は十分に大きいとは判断されなかった（Autio et al. 2008）。それでも、最近選定されたDAWEレファレンス設計では複数の追加的な利点が認められるため、この問題に再度注目する必要があるかもしれない。

この方法では、原理的には、2本の坑道の上に340 mのコア孔をドリル掘削し、リーマーヘッドを末端の1つに接続して、当該横坑を300 mまでリーミングする。構成要素の設置に

先立ち、リーミング用パイロット孔（40 m）を通じて、また小さなチタン製プラグを通じて、排気管と給水管が設置される。その後、300 mの横坑全体に構成要素を設置すれば、コンパートメント・プラグの1つを実質的に節約することができる。

#### 5.2.10 操業、職業安全及び環境への影響

KBS-3H処分場の操業及び職業安全面での対応は、KBS-3H概念のより成熟した設計を用いて更新されなければならない。

環境への影響については、将来の必要とされる活動の中に、以前に行われた試験的な比較作業の結果をKBS-3H概念のより成熟した設計を用いて更新する作業を含める必要がある。淡水の消費も、以前に設定された研究活動のリストに含まれるべきである。時の経過と共にKBS-3Hを採用する利点がどのように失われてゆくのかを明らかにするために、将来施設の操業が開始された後にKBS-3VをKBS-3Hバリエーションに変更する代替策が取り扱われるべきである。

また今後の研究では、材料の選定と処分場の建設が環境面で及ぼす影響を最小限に抑える方法が取り扱われるべきである。



## 6 検討及び結論

### 6.1 実証

#### 6.1.1 多目的試験 (MPT)

MPTは、KBS-3H設計の段階的な開発において直近に行われた実証活動であるが、それ以前にもエスポHRLでは一定数の実規模原位置実証が行われている（文献 [Bäckblom et al. 2005]、[Autio et al. 2008] 及び [SKB 2012] を参照）。MPTは、以前に行われた開発作業と、KBS-3H設計の実施とさまざまな構成要素を組み合わせた場合のそれらの相互機能に関する初期検証を実現する目的とを、統合するものである。

またMPTでは、周囲原位置条件下での実規模作業に関する経験を積み、それによってDAWE設計に関連して生じうる実施上の諸問題に関する認識を高めることも目標として設定されている。

#### MPTで得られた経験

MPTにより、KBS-3H設計の可能性、すなわち事前に組み立てられた構成要素と共に機能するスリム化されたシステムに固有の強みが明示されたという結論が示されている。KBS-3Hの中心的な構成要素が相互に組み合わせられた形で試験され、DAWE手順が基本的に意図されたとおりに実施された。より多くのセンサー・データが入手され、試験装置が最終的に解体される時点で、構成要素の実際の機能の評価を行わなければならない。

この試験では、さらなる開発が必要と見なされた実施面での問題もいくつか特定されている。特に、異なる含水率（11%及び17%）のブロックを取り扱う必要があるため、現時点では組み立て作業場所と貯蔵場所での最適な相対湿度レベルを設定することができない。MPTの実施中に見いだされたブロックの割れに関する課題により、ベントナイト構成要素を取り扱う全てのステップで制御された環境を確立することの重要性が示されている。MPTでの経験に基づき、将来の開発作業では、含水率が共通するスーパーコンテナ・ブロックを用いてブロック設計を更新することが可能かどうかの評価が行われるべきである。

クローズアップされたもう1つの実施面での問題として、コンパートメント・プラグの溶接に関連する実際面での困難が生じたことが挙げられる。これは同様の設計を備える横坑プラグにも関連するものである。同様に、プラグのカラーの最下部に排水管を設置し、ペレット充填前に自然流入する水の排水を行えるようににする必要が認識された。今後、これらの経験で得られた成果は全て設計図に書き加えられ、KBS-3Hプラグの設計が更新されることになる。

またKBS-3H定置装置に関しては、このMPTにより、現時点の定置装置でも、制御され、構成要素の間に良好な接触を保った上で自動化された定置シーケンスを実施することは可能であることが実証されている。また現行プロトタイプが排気管の利用に全面的に適合するものではないことが明らかになっており、将来の開発作業でこの問題が取り扱われるべきである。

運搬及び定置時にベントナイト構成要素に水しぶきがかかる問題が以前の開発活動ですでに明らかになっており、今後さらなる実規模ベントナイト構成要素の設置作業を行う前

に対応しておかなければならない。しかしこの水しぶきは、構成要素をすぐさま破壊したり、劣化させたりするものではないと考えられている。だがこの問題は機械面での改良によって解決できるものであり、そのための作業が次の開発作業に組み込まれるべきである。

上述した実施面での問題に加えて、KBS-3Hプロジェクトでは将来の設置に関する多くの経験が得られた。現在では、改良型のセンサー・システムを含め、構成要素の組み立てと設置の両方について、方法論が存在している。

### 6.1.2 ドリル掘削作業

当初はエスポHRLの長さ100 mのスケールで、その後にONKALOで長さ300 mのスケールで実施された操縦を伴うコアドリル掘削作業により、KBS-3H要件を厳格に達成できることが示され、必要とされる300 mの定置横坑を実現する技術が存在するという確信がもたらされた。この結論は現行KBS-3Hレファレンス法である「プッシュ・リーミング」法に基づくものである (Bäckblom et al. 2005)。このプッシュ・リーミングにより、操縦を伴う76 mmのコア孔を、操縦を伴うコア・パイロット軌跡から大きく逸脱することなく、段階的に完全な直径 (1.85 m) まで正確にリーミングする作業が確実に実施されるはずである。

ONKALOでの300 mのドリル掘削では多くの操縦作業が必要となったが、定置横坑を並行してドリル掘削する場合には、ドリル掘削方向における岩盤条件はきわめてよく把握されていることから、ドリル掘削の最適化が可能となろう

またこのドリル掘削作業により、方法及び戦略の改善が実現して要件の履行に近づいただけでなく、要件に関連した偏差装置データの実行及び評価の方法に関する経験も深められた。

### 6.1.3 加熱を伴うスーパーコンテナ試験

現時点ではまだ加熱を伴うスーパーコンテナ試験に関する報告は行われていないが、この試験では、含水率が14%のブロックを正確な密度で製造できることが実証されている。またこの試験では、高温のキャニスタが定置され、その熱によってブロック内の水の再分布が開始された時点でも、スーパーコンテナ・シェルがそのさまざまな構成要素をまとめて保持していることも実証されている。

## 6.2 安全評価

以前及び現行プロジェクト・フェーズで実施された研究により、KBS-3Hにとってきわめて重要なものと特定されていた長期安全性に関する問題のほとんどが解決されている。これらは、以前行われた安全評価 (2007年) において、主としてシステムの初期変遷に関連して特定されたものである。この点に関しては、設計変更、横坑内の緩衝材及びその他の粘土構成要素の初期膨潤を改善する人工湿潤化の採用によって対処されている。スーパーコンテナの材料の変更により、緩衝材に衝撃が生じるリスクが低減された。現在、横坑が要求されているとおりの変遷を辿ることを実証するために、すなわち、緩衝材がスーパーコンテナ・シェルの穿孔を通じて膨張し、シェルと岩盤との間の隙間を埋め、隙間の内部であらか

じめ規定されている密度及び膨潤圧に達することを実証するために、実験研究、モデル化作業及び現場試験 (MPT) が進められている。その他の問題としては、たとえば、迷走電流がキャニスタに及ぼす可能性のある影響などが挙げられる。これまでに行われたスコーピング計算によれば、この迷走電流はKBS-3H横坑内のキャニスタには限られた影響しか及ぼさないと予想されているものの、現在さらなる解析が進められている。また、現在評価が進められている問題として、緩衝材が失われた場合にTiとの接触に起因して生じる可能性のある銅の電解腐食のリスクが挙げられ、この問題は最終的にはCuなどを代替シェル材料として採用することにより解決できると考えられている。

KBS-3Hプロジェクトの現行フェーズで行われている評価によれば、岩盤せん断に関してKBS-3HとKBS-3Vとの間に有意の相違が生じることはなく、破損リスクにさらされるキャニスタの数も、KBS-3HとKBS-3Vでほぼ同じ桁数に収まることになる。

粘土構成要素の化学的浸食は、KBS-3Hにとってより大きな問題となる。そのプロセスが限定的なものであることが実証できれば、KBS-3Hにおいても長期安全要件の達成を示すことができるものと見込まれる。化学的浸食と堆積作用の問題の取り扱いはSKB社とボシヴァ社の共同プロジェクトで行われる予定であり、このプロジェクトの目標は、当該プロセスに関する理解を、さらにはプロセスに影響を及ぼすパラメータに関する理解を深めることに、さらには将来の安全評価で利用する信頼性の強化された定量モデルの実現を目指してモデル化能力を開発することにある。

現行プロジェクト・フェーズで実施されている安全評価作業に関する詳細は、2017年春にはまとめられ、発表される予定である。

## 参考文献

- Andersson J, Ahokas H, Hudson J A, Koskinen L, Luukkonen A, Löfman J, Keto V, Pitkänen P, Mattila J, Ikonen A T K, Ylä-Mella M, 2007. Olkiluoto site description 2006. Posiva 2007-03, Posiva Oy, Finland.
- Autio J, Hagros A, Johansson E, Börgesson L, Sandén T, Rönnqvist P-E, Eriksson M, Berghäll J, Kotola R, Parkkinen I, 2007. Design description 2006. Posiva Working Report 2007-105, Posiva Oy, Finland. (Also published as SKB R-08-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.)
- Autio J, Johansson E, Hagros A, Anttila P, Rönnqvist P E, Börgesson L, Sandén T, Eriksson M, Halvarsson B, Berghäll J, Kotola R, Parkkinen I, 2008. KBS-3H Design Description 2007. SKB R-08-44, Svensk Kärnbränslehantering AB. (Also printed as Posiva Report 2008-01.)
- Bäckblom G, Lindgren E, 2005. KBS-3H - Excavation of two horizontal drifts at the Äspö Hard Rock Laboratory during year 2004-2005. Work description, summary of results and experience. SKB R-05-44, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Börgesson L, Hernelind J, 2016. Effect of a rock shear through a KBS-3H tunnel. In: Posiva 2016a. Safety evaluation for a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto – Design Basis. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2016-05, Appendix B. (In prep.)
- Börgesson, L, Johannesson L-E, Autio J, Sandén T, Pintado X, Smith P, 2016. Summary Report – Design of Buffer and Filling Components. SKB P-16-18, Svensk Kärnbränslehantering AB. (In prep.)
- Eriksson M, Lindström L, 2008. KBS-3H post-grouting. Mega-Packer test at -220 m level at Äspö HRL. SKB R-08-42, Svensk Kärnbränslehantering AB. (Also printed as Posiva Working Report 2008-11.
- Gribi P, Johnson L, Suter D, Smith P, Pastina B, Snellman M, 2007. Safety assessment for a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto. Process report. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2007-09. 431 p. ISBN 978-951-652-157-5. (Also printed as SKB R-08-36, Svensk Kärnbränslehantering AB.)
- Gugala J, Thurner E, Svemar C, 2015. Final report LUCOEX. European Commission: Community Research. LucoEX Deliverable D- N°:1.22.
- Gustafsson C, 2015. KBS-3H BIPS and Radar in K08028F01. SKB P-15-12, Svensk Kärnbränslehantering AB. (In prep.)
- Halvarsson B, 2008. KBS-3H Horizontal emplacement technique of supercontainer and distance blocks. Test evaluation report. SKB R-08-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hellä P, Hagros A, Kosunen P, Mattila J, 2016. RSC-3H – Rock Suitability Classification for KBS-3H. In: Posiva 2016a. Safety evaluation for a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto – Design Basis. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2016-05, Appendix C. (In prep.)
- Hernelind J, 2010. Modelling and analysis of canister and buffer for earthquake induced rock shear and glacial load. SKB TR-10-34, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hjerne C et al, 2015. KBS3H project/DETUM Large fractures. Hydraulic interference tests in boreholes K03009F01 and K08028F01. SKB P-15-04, Svensk Kärnbränslehantering AB (In prep.)
- Hoek J, Hartley L, Baxter S, 2016. Hydrogeological modelling for the Olkiluoto KBS-3H Safety Case. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. Working Report 2016-21. (In prep.)
- Hoek J, Hartley L, Joyce S, Marsic N, Crawford J, Sidborn M, 2016. Modelling hydrogeochemical evolution for the Olkiluoto KBS-3H safety case. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2016-11. (In prep.)
- Ikonen K, Raiko H, 2015. Thermal analysis of KBS-3H repository. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. Working Report 2015-01. (In prep.)
- Johannesson L-E, 2002. Äspö Hard Rock Laboratory. Manufacturing of bentonite buffer for the prototype repository. SKB IPR-02-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Johannesson L-E, 2014. Manufacturing of buffer and filling components for the Multi Purpose Test. European Commission: Community Research. LucoEX Deliverable D- N°:4.01. <http://lucoex.eu/files/D0401.pdf>

Johannesson L-E, Kristensson O, Åkesson M, Eriksson P, Hedin M, 2014. Tests and simulations of THM processes relevant for the buffer installation. SKB P-14-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Komulainen et al, 2015. KBS-3H — DETUM. Difference flow logging in boreholes K03009F01 and K08028F01. SKB P-15-13, Svensk Kärnbränslehantering AB. (In prep.)

Kristensson, O., Sandén, T., Börgesson, L. & Åkesson, M. 2016. Summary Report – KBS-3H Buffer Laboratory Tests. SKB P-16-17, Svensk Kärnbränslehantering AB. (In prep.)

Kronberg M, 2015. KBS-3H. Preparations, assembly and installation of the Multi Purpose Test. European Commission: Community Research. LucoeX Deliverable D-N°:D4:03.

Lönnqvist M, Hökmark H, 2007. Thermo-mechanical analyses of a KBS-3H deposition drift at Olkiluoto site. Olkiluoto, Finland: Posiva Oy. Working Report 2007-66.

Nilsson, G. 2015. Steered core drilling of boreholes K03009F01 and K08028F01 at the Äspö HRL. European Commission: Community Research. LucoeX Deliverable D-N°:D4:05. <http://lucoex.eu/files/D0405.pdf>

Ojala, M. & Von Numers, T. 2014. Deposition machine upgrades during the Multi Purpose Test. European Commission: Community Research. LucoeX Deliverable D-N°:4.02. <http://lucoex.eu/files/D0402.pdf>

Pekkarinen, M. 2014. The effect of the FPI-rule on the suitability of the KBS-3H concept. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. Working Report 2014-63.

Pintado, X., Schatz, T. & García-Siñeriz, J.-L. 2015. Initial data report for the Multi Purpose Test. European Commission: Community Research. LucoeX Deliverable D-N°:4.06. <http://lucoex.eu/files/D0406.pdf>

Pintado, X. et al. 2016a. KBS-3H. Second Data Report for the Multi-Purpose Test. SKB P-16-16 (In prep.)

Pintado X, Kristensson O, Malmberg D, Åkesson M, Olivella S, Puig I, 2016b. TH and THM-modelling of a KBS-3H repository drift. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. Working Report 2016-25 (In prep.)

Posiva, 2005. Olkiluoto site description 2004 (Vol 1–3). Posiva 2005-03, Posiva Oy, Finland.

Posiva 2012a. Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto – Design Basis 2012. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2012-03.

Posiva 2012b. Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto – Synthesis 2012. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2012-12.

Posiva 2012c. Description of KBS-3H design variant. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2012-50.

Posiva 2013. YJH-2012 Nuclear waste management at Olkiluoto and Loviisa power plants: Review of current status and future plans for 2013–2015. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. YJH-2012.

Posiva 2016a. Safety evaluation for a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto – Design Basis. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2016-05. (In prep)

Posiva 2016b. Safety evaluation for a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto – Description of the Disposal System. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2016-04. (In prep.).

Posiva 2016c. Safety evaluation for a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto – Features, Events and Processes. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2016-03. (In prep.)

Posiva 2016d. KBS-3H – Design, production and initial state of buffer and filling components. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2016-06. (In prep.)

Posiva 2016e. KBS-3H – Design, production and initial state of the compartment and Drift Plug. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2016-07. (In prep.)

Posiva 2016f. KBS-3H – Design, production and initial state of the supercontainer. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2016-08. (In prep.)

Posiva 2016g. KBS-3H - Design, construction and initial state of the underground openings. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2016-09. (In prep.)

Posiva 2016h. Design and production of the KBS-3H repository. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2016-10 (In prep.). (In prep.)

Posiva 2016i. KBS-3H disposal facility description. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2016-xx (In prep.). (In prep.)

Posiva 2016j. Steered core drilling of pilot hole ONK-PH28 in ONKALO at Olkiluoto 2015. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. Working Report 2016-60. (In prep.)

Raiko H (ed.), Pastina B, Jalonen T, Nolvi L, Pitkänen J, Salonen T, 2012. Canister Production Line 2012 – Design, production and initial state of the canister. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2012-16.

Schatz T, Akhanoba N, 2016. Bentonite buffer erosion in sloped fracture environments. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2016-13. (In prep.)

Sigurdsson O, 2015. KBS-3H Boremap mapping of K08028F0. SKB P-15-14, Svensk Kärnbränslehantering AB. (In prep.)

SKB, 2001a. RD&D-Programme 2001. Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste. SKB TR-01-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2001b. Forsknings-, utvecklings- och demonstrationsprogram för ett KBS-3-förvar med horisontell deponering [Research, development and demonstration programme for a KBS-3H repository with horizontal deposition]. SKB R-01-55, Svensk Kärnbränslehantering AB. (In Swedish.)

SKB, 2004. RD&D-Programme 2004. Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste. SKB TR-04-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB 2010a. Design and production of the KBS-3 repository. SKB TR-10-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB 2010b. Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository. SKB TR-10-13, Svensk Kärnbränslehantering AB. Updated 2011-12.

SKB 2011. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark - Main report of the SR-Site project. SKB TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB 2012. KBS-3H Complementary studies 2008-2010. SKB TR-12-01, Svensk Kärnbränslehantering AB. (Also published as POSIVA 2013-03.)

Smith P, Neall F, Snellman M, Pastina B, Nordman H, Johnson L, Hjerpe T, 2007. Safety assessment for a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto - Summary Report. Olkiluoto, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2007-06. 189 p. ISBN 978-951-652-154-4 (OR: SKB R-08-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.)

Smith P, Schatz T, Reijonen H, Hellä P, 2016. Chemical erosion and mass redistribution of bentonite in a KBS-3H repository. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. POSIVA 2016-12. (In prep.)

Tiensuu et al 2015. KBS-3H. Geophysical logging of borehole K08028F01. SKB P-15-15, Svensk Kärnbränslehantering AB. (In prep.)

Thorsager P, Lindgren E, 2004. KBS-3H. Summary report of work done during Basic Design. SKB R-04-42, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Wersin P, Grolimund D, Brendlé J, Huve J, Kiviranta L, Snellman, M, 2016. KBS-3H. Titanium-clay interaction studies 2013-2015. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. Working Report 2016-26. (In prep.)

## 第8章 まとめ

### 8.1 はじめに

本調査では、2.1.1 に示したように、平成 21 年度以降、理想的な系における小規模試験、単純な系における土槽試験、さらには複合的な系における工学規模試験へと、緩衝材の性能評価上問題となる現象の影響を試験によって確認し、検討すべき現象を段階的に絞り込みながらスケールアップさせることを基本として試験を実施している。表 7.2.1-1 に試験分類を示す。

表 8.2.1-1 試験のスケールと試験項目 (再掲)

再冠水時に考慮すべき緩衝材の挙動	小規模試験	土槽試験	工学規模試験 (複合問題)
地下水浸潤	(a): 不飽和浸潤速度	—	—
	(b): 施工品質 (密度分布) の均質化	(c): 施工品質 (密度分布) が再冠水に及ぼす影響 (d): 異種材料界面を有する緩衝材の浸潤状況	—
	(e): 再冠水時の間隙空気の影響		
緩衝材の化学変質	(f): 緩衝材のイオン交換反応	—	—
緩衝材の流出	(g): 緩衝材表面近傍の止水性能評価	—	(h): 幌延地下施設における緩衝材流出試験

平成 23 年度より、本検討の試験計画の基本方針であるスケールアップを実践し、試験(a)をスケールアップした土槽規模試験として、(c) : 施工品質 (密度差) が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響の調査のための試験、を開始した。さらに、(g) : 緩衝材表面近傍の止水性能評価、及び (h) : 幌延地下施設における緩衝材流出試験の中で、小規模から工学規模までの緩衝材流出試験を、段階的に試験規模を拡大しながら実施している。また、上記の試験に加え、解析による評価方法の検討として、湧水による緩衝材への影響に着目した、湧水量の評価と工学的対策の効果の評価を平成 26 年度から行っている。本年度からは、これまでの試験の結果をモデル化し、再冠水時の挙動を力学解析によって評価する方法について検討した。さらに、これまでの研究成果を緩衝材の設計基準や、施工方法に反映するための知見の整理と十分性を確認するための手法についても検討した。



## 8.2 平成 28 年度の成果

平成 28 年度の成果を取りまとめると、以下のようになる。

### 8.2.1 緩衝材への地下水浸潤に関わる調査

#### (1) 緩衝材の地下水浸潤状況の評価

##### 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）

浸潤速度を取得することは、再冠水による緩衝材の膨潤挙動をモデル化する上で非常に重要である。そこで本研究では、一次元が成り立つと考えられる簡単な境界条件における水と海水相当のイオン強度の NaCl 水溶液(0.5M)が緩衝材に浸潤する際の速度を取得することを目的として試験を実施した。

乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$ 、初期含水比 10% のケイ砂 30wt% 含有ベントナイトの供試体 ( $\phi 50\text{mm} \times h 1,000\text{mm}$ ) に対して、蒸留水と NaCl 水溶液を通水した。これまでに、蒸留水のケースの場合、飽和度が 1% 高くなる場所を浸潤フロントと定義すると、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  $d=60t^{0.35}$  で近似でき、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 式よりも緩慢であることがわかった。NaCl 水溶液の場合、浸潤フロントの位置  $d(\text{mm})$  と給水時間  $t(\text{day})$  の関係は  $d=14t^{0.5}$  と近似できるが、浸潤速度は蒸留水の場合よりも遅いことが明らかであった。NaCl 水溶液の場合、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減少していると考えられる。そのため、NaCl 水溶液の場合に毛管現象が妨げられるため、浸潤速度は遅くなったと考えられる。95% の飽和度となる飽和速度は NaCl 水溶液の方が浸潤が遅い分、入口から飽和度が高くなっていくために NaCl の方が早いと考えられ、浸潤のフロントから飽和のフロントまでの遷移領域は蒸留水の方が大きい。

今年度は、継続的にこの試験系を用いて給水圧を増加し、水圧の効果についての試験を行った。給水圧の増加に伴って、給水流量は上がっており、流量の増加は NaCl 水溶液の場合の方が顕著である。しかし、比抵抗値を飽和度に換算して得られる浸潤フロント及び飽和フロントに対して給水圧を増加した影響はまだ観測されていない。また、試験機上部で計測している軸応力に関しても圧力を増加した影響は読み取れていない。計測に関して、試験スケールと計測感度の関係で測定値への影響が遅延している可能性もあり、継続して測定をしていくことが必要である。

##### 2) 長尺ベントナイト供試体を用いた一次元速度取得（変形条件）

実際の処分場環境での緩衝材への地下水浸潤は岩盤等との隙間がある場合には、緩衝材の膨潤変形も伴っているものと考えられる。本調査は、膨潤変形の変位を求めることを目的として実施した。

本試験は、前項と同じ試験装置を用いて、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しつつ、膨潤による変位も測定した。

高さ 300mm、直径 50mm の供試体の上部 700mm分を蒸留水で満たし、自由吸水できる条件で膨潤量試験を実施した。他の条件は、前述の一次元浸潤速度取得試験（密度一定条件）と同等とした。膨潤中の密度分布は比抵抗計測と目視観察によって行った。

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が、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、膨潤変形量は小さかった。また、膨潤量は、時間経過に対して一定速度で膨潤しておらず、本試験の場合、試験開始から 20 日から 40 日目にかけて大きく膨潤していた。210 日目の供試体表面は、供試体底面から 416.8mm であり、比抵抗計測可能な高さは 337.5mm であった。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」の経時変化を比較すると、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と概ね一致していることが分かった。ただし、両者は飽和度が異なると考えられるため、注意が必要である。

目視観察結果から得られた浸潤距離は、20 日目以降は一定であり、その後は膨潤厚さのみが増加傾向である。このことから、20 日以降は浸潤領域で膨潤変形のみが進み、供試体内部にはあまり水が供給されていないことが考えられる。この傾向は、距離の大きさの違いはあるものの、比抵抗計測結果でも同様であった。本試験は継続して実施する。

## (2) 施工品質（密度差）が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響の調査

### 1) 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響

本研究は、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取得し、モデル化することを目的としている。

本試験では、密度の異なる供試体同士を、ピストンを介して直列に繋いだ膨潤量試験(直列膨潤量試験)に設置し、乾燥密度  $1.8\text{Mg/m}^3$  と  $1.4\text{Mg/m}^3$  (Case1)、 $2.0\text{Mg/m}^3$  と  $1.2\text{Mg/m}^3$  (Case2)、 $1.7\text{Mg/m}^3$  と  $1.5\text{Mg/m}^3$  の (Case3) という 3 つの組み合わせで試験を実施し、密度分布、膨潤圧等を取得した。以下に蒸留水を浸潤させた場合と NaCl を浸潤させた場合の結果を示す。

#### (a) 試験結果（蒸留水のケース）

全ての試験ケースにおいて、高密度の供試体と低密度の供試体の密度が均質となるような挙動を示すが、最終的に密度差は残留した。また、初期の密度差が大きいものほど、残留密度差が、大きくなった。

直列膨潤量試験のうち乾燥密度  $1.4\text{Mg/m}^3$  -  $1.8\text{Mg/m}^3$  ケース及び  $1.5\text{Mg/m}^3$  -  $1.7\text{Mg/m}^3$  ケースを解体した。ただし、供試体の解体に際しては、超音波カッターを用いた供試体スライサーを新たに適用した。膨潤量から算出した平均乾燥密度と解体結果は概ね整合する結果となった。両供試体共に十分に飽和しているのにも拘らず密度分布が明確に残っていることから、緩衝材の施工時に密度分布が発生すると膨潤後でもある程度の密度分布が残留するものと考えられる。また、解体結果から、両供試体の上下端面で密度低下が激しいことが分かった。この乾燥密度の低下が直列膨潤量試験中に発生したものか、解体時に発生したものかは不明であるが、供試体作製時に

載荷面側が高密度になり、供試体底部が低密度になる傾向にあることから、上下端面の密度低下は供試体作製時のものと推察された。また、ピストン側(±0mm 付近)での密度低下が試験中の膨潤によるものだとすると、このことが、本直列膨潤量試験のケースで膨潤挙動が非常に緩慢だった原因である可能性がある。

#### (b) 試験結果 (NaCl 水溶液ケース)

0.5M の NaCl 水溶液を使用した密度差のある供試体の直列膨潤量試験においても、すべてのケースで密度差が残った状態で定常状態に達した。

ただし、NaCl 水溶液の試験の方が残留密度差が大きいことが分かった。さらに、蒸留水のケースに比べ、NaCl 水溶液ケースの方が膨潤圧は小さい傾向を示した。このことは、NaCl 水溶液を用いて実施した場合の直列膨潤量試験の膨潤量は、蒸留水のケースに比べ、イオン強度の影響で小さいことによるものであると考えられる。

NaCl 水溶液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った。これは、乾燥密度が大きい供試体は吸水膨潤するためであると考えられる。

また、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、残量密度差に起因する透水係数分布を取得した。試験後の透水係数は蒸留水のケースで  $10^{-13}\text{m/s}$  オーダーであるのに対し、NaCl 水溶液のケースでは  $10^{-11}\text{m/s}$  から  $10^{-12}\text{m/s}$  程度となり、NaCl 水溶液の方が大きくなった。NaCl 水溶液のケースは、均質化の挙動がまだ定常にいたっていないため引き続き試験を継続し、来年度に解体を予定している。

#### 2) 応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響

本検討は、前項の試験の結果の力学的な解釈の妥当性を検証するために実施した、密度が同じであっても応力履歴が異なる供試体として、正規圧密供試体（乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  に静的に締固めた後に体積拘束条件で飽和したもの）と過圧密供試体（乾燥密度  $1.8\text{Mg/m}^3$  に静的に締固めた後に乾燥密度  $1.6\text{Mg/m}^3$  まで膨潤させながら飽和したもの）の 2 種類の供試体を使用した。これらの供試体同士を、ピストンを解して直列に繋いだ膨潤圧試験では、両供試体と同じ密度であるのにも関わらず、応力状態が釣合っていないため変形（密度分布）が生じることが分かった。このことからベントナイトは均質化するまで膨潤するのではなく、力が釣合い状態に至るまで膨潤するという解釈ができる。

イオン強度 0.5 の NaCl 水溶液を用いて応力履歴が膨潤挙動に及ぼす影響についても試験を実施した。蒸留水を用いた直列膨潤量試験の供試体の解体の結果、密度分布が生じていたため、NaCl 水溶液で過圧密供試体の作製は、先に飽和させてから膨潤させることとした。試験では、前述の蒸留水と同様に、正規圧密供試体が過圧密供試体を押し戻す傾向が見られ、蒸留水と同様の傾向であった。

以上から、ベントナイトは均質化するまで膨潤するのではなく、力が釣合い状態に至るまで膨潤するという解釈は妥当であると考えられる。

この現象を弾塑性力学的に解釈すると、高密度領域の応力状態は膨潤線を辿り、低密度領域の

応力状態は圧縮線を辿るため、両者は乾燥密度と応力の平面で交わることなく（膨潤圧が平衡状態にあることと密度分布が均質化することが同時に成り立つことがなく）、応力の釣合う点で密度の平均化は止まる（密度分布が残る）ということを説明できた。既往の研究で取得した  $e\text{-}\log P$  関係からもこの弾塑性力学に立脚した解釈の妥当性が確認できた。

残留密度差を弾塑性力学に立脚して説明しようとする、本研究の膨潤挙動を説明できる非常に幅広い応力レベルで実施された圧密試験結果が存在しないため、本検討で実施した直列膨潤量試験から得られた残留密度差の結果を理論的に説明するためには、乾燥密度- $\log p$  関係を新たに取得すべく圧密試験を行っている。

### (3) 施工品質による密度分布の均質化の検討

本調査は、緩衝材の施工法を緩衝材の密度分布、隙間の有無、隙間の大きさなどで代表させ、様々な地下水組成の条件で緩衝材の施工方法に起因する密度分布などが再冠水時の膨潤挙動、膨潤による均質化挙動に及ぼす影響を検討するために実施した。

試験では供試体寸法が W700 mm×H200 mm×D150mm の土槽を使用した。本年度は、ブロックとペレット両方を用いて NaCl 水溶液(0.5M)を通水させたものを解体した。

NaCl 水溶液 (0.5 M) を用いたケースで蒸留水の場合と異なるのは、NaCl 水溶液で隙間が満たされたペレットは、その場で膨潤するのではなく、崩れながら、一旦土槽下部に沈殿し、その後膨潤している点であった。また、ペレット部に供給されている NaCl 水溶液が、ブロック部に対して側方からの NaCl 水溶液の供給源となっている状況も観察された。目視観察では、ブロック部に対しては、下面からとペレット側からの NaCl 水溶液が供給されるため、浸潤面（浸潤に伴って色調が暗くなっている領域）が L 字型に進展していた。このことは、比抵抗計測結果と整合していた。

解体した供試体から、供試体の平均的な飽和度が 85%程度という結果となった。これは、給水停止から解体までにある程度の時間を要したことによる乾燥やアクリル面側の繋ぎ目からの漏水などの可能性がある。試験中の比抵抗電極による計測結果と給水量と空隙体積の関係や目視観察結果が概ね整合していることから、試験期間中は十分に飽和しているものと考えられる。また、比抵抗値が膨潤による密度変化の影響を受けている可能性も考えられる（SKB によるレビュー。添付資料参照）。

### (4) 湿潤による空隙空気の移行調査

本試験は、再冠水時に緩衝材中にトラップされた空気が地下水の浸潤挙動に及ぼす影響を調べるために実施している。

試験では、1000mm の長尺アクリルセルの中央にポーラスメタルを配置して、その上下を乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup> のベントナイトで挟み込むようにセットした供試体を用いて、空隙空気の浸潤への影響を検討した。

試験の初期段階では、給水による空隙体積の減少に伴う空隙空気圧は増加し、空隙水への空隙空気の溶解による空隙空気圧の減少などの現象はほとんど発生していなかったが、空隙空気圧と大気圧の経時変化から、給水圧が低い段階では、空隙の空気が空隙水に溶存したと考えられる挙

動を示した。間隙空気圧は、約 2 年間で増減があったが、最終的に安定した。このことから、供試体への物質移動の収支が、給水と間隙水への間隙空気の溶存のみで決まり、不規則な間隙空気の移動などが生じていないものと考えられた。

間隙空気圧はほとんど変化が見られない状態に達したため、試験を終了した。

## 8.2.2 再冠水時の緩衝材の変質に関わる検討

### (1) Ca 型化と飽和の可逆性検討

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の浸出液に含まれる 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る反応で、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、化学変質と飽和の事象の順番によって緩衝材の性能に違いが生じるかどうかを検討することを目的としている。

Na 型ベントナイトを蒸留水で飽和した後に CaCl<sub>2</sub> 水溶液を通水したケース(Case1)、Na 型ベントナイトに直接 CaCl<sub>2</sub> 水溶液を通水したケース(Case2)、Ca 型ベントナイトに CaCl<sub>2</sub> 水溶液を通水したケース(Case3)について試験を行った。

最終的に全てのケースで透水係数はほぼ同等となった。このことから、人工給水によって Ca 型化の進行を遅延させる効果があるが、最終的な性能は変化しないことが明らかとなった。

それぞれの試験後の供試体について、モンモリロナイトの Ca 型化について分析した結果、全ての試験で概ね均一に Ca 型化していることが分かった。試験中の透水係数、膨潤圧の測定結果と合わせて考えると、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 型化と飽和の起こ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。特に、一旦、飽和させてから Ca 型化させると膨潤圧が低下するという結果となっている。本試験では、通水条件を複数回変えているため、確認のためにシンプルな系で再現性確認を実施する必要があると考え、再現性確認のための試験を行っている。

再現性確認試験において、CaCl<sub>2</sub> 水溶液を用いて飽和させているケースでは膨潤圧が定常状態に至っている。一方、蒸留水のケースでは、加圧給水後も膨潤圧が漸増している。現状では、蒸留水のケースの膨潤圧が低いが、これは浸潤速度（飽和フロント）が遅いためであると考えられる。十分に Ca 型化するのを待って再現性の確認を行う。

### (2) 鉄が緩衝材に及ぼす影響の検討

吹き付け工法で実規模の施工試験を行った後に、この供試体を用いて緩衝材の流出に係わる試験を行った。初期に破過圧を測定した後、体積拘束した状態で給水し、緩衝材が膨潤することによって、流出現象を抑制できることを期待したが、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。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たため、鋼製モールド近傍のベントナイトが鉄の影響を受けたことが予想される。膨潤効果が低下した原因として、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 型化したことが考えられるため、本試験で用いた緩衝材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。

#### 1) 緩衝材化学変質に関する変質物質の分析

平成 27 年にこのベントナイトを解体し、鋼製モールドに接する部分を採取したものを試料としてとして用い、鉄と接した面から 5cm の深さまで変色していた試料について、分析を行った。この供試体と比較のために、5 年、あるいは 10 年間 80°C、還元雰囲気下で淡水系、海水系両方のバッチ式浸漬試験した試料についても分析を行った。

EPMA, FESEM-EDS, XRD, CEC, 陽イオン交換量などの分析結果から、ベントナイトは Fe 型化しているのみではなく、水酸化鉄がベントナイト中に細かい粒子として分散していること、また、変質して別の鉱物になっていることがわかった。純水に近い系であれば、Fe の溶解によって生成する Fe(OH)<sub>2</sub> は溶解度が高く、平衡溶液の pH は 25°C の場合、10.4 とアルカリ条件となる。モンモリロナイトは溶解して Fe-Al 蛇紋石であるパーチェリンや Fe 緑泥石であるシャモサイトに変質する。その時に余剰のシリカと Fe が過剰にあればフェロシライトも生成する。炭素鋼の界面に見られたのは界面よりより深い部分に見られる粒状のウスタイトから、亀裂を伴う Fe 斜方輝石であるフェロシライトと、その上に分布する Fe 蛇紋石であるグリーンライト、さらに Fe サポナイトまでの積層変質相であった。ベントナイトと混合されたケイ砂のシリカがこの反応に寄与しており、これまでに提唱されている反応経路と違っていると考えられる。80°C でのバッチ式試験で得られたベントナイトの分析においても、反応生成物に違いが見られるものの、変質の方向はどの条件でも同じであった。低温でも pH が高い条件であればモンモリロナイトの変質は進行する可能性が示された。

Fe の浸透は進んでいるものの、変質は接触面からごく近いところに限られているため、変質がどの程度影響するかは検討の必要があるが、鉄—ベントナイト相互作用が緩衝材の膨潤機能に影響していることは十分に推測されるため、注意が必要である。

#### 2) 化学変質による膨潤性能低下の検証

変質部のブロックサンプルを用いて、変質前後の膨潤圧と破過試験時の最大送水（破過）圧を比較し、化学変質による最大送水（破過）圧低下の原因について検討を行った。XRF によって、より変質が顕著な部分を選んで試験に供した。比較のために、健全な Na 型ベントナイト、及び Ca 型ベントナイトについても同様に試験した。変質前後の膨潤圧と破過試験時の最大送水（破過）圧を比較し、化学変質による最大送水（破過）圧低下の原因について検討を行った。

破過については、2通りの考え方があり、1つは、給水開始当初、給水圧は供試体に対して全応力として作用し、給水圧が増加するほど膨潤圧計測過程では膨潤圧として計測されていた軸圧が漸減するとして、この軸圧が漸減し、ゼロとなった時点を破過とする考え方である。この考え

方は、上面の給水圧が有効応力の増加に寄与するという考え方ともいえる。他方は、膨潤圧と給水圧の差が有効応力として、この有効応力がゼロとなった時点を破過とする考え方である。止水性が高いものほど給水圧が全応力として作用するために前者の現象を呈し易く、止水性が低いものほど間隙水圧が上昇し易いために後者の現象を呈し易いと考えられる。

乾燥密度を変えた試験では、破か圧は、乾燥密度が大きいほど大きくなった。Ca型化したベントナイトの膨潤圧の経時変化は、同じ乾燥密度のNa型ベントナイトよりも大きいですが、止水性が低いために膨潤圧が定常になるのは早いことが分かった。また、Ca型化ベントナイトでは、有効膨潤圧で定義した破過が発生する可能性はあったが、全応力で定義した破過は給水圧を大きくしても発生しないという結果となった。これは、Ca型化ベントナイトのケースでは、膨潤圧が高い、その一方で比較的透水係数が大きいためであると考えられる。

鉄による変質が懸念された試料とNa型ベントナイトの各乾燥密度の膨潤圧の経時変化の比較から、乾燥密度は1.6Mg/m<sup>3</sup>程度であったが、平衡膨潤圧は、未変質Na型ベントナイトの乾燥密度1.2~1.6Mg/m<sup>3</sup>の値であった。変質前のNa型ベントナイトに比べて膨潤圧が明確に低下しているため、前述の1/4リング実規模緩衝材の破過試験において破過が発生した一因ではないかと考えられる。また、境界条件が異なる為に一概に比較できないが、少なくとも有効応力で定義した破過の方が実際の試験結果と比較的整合する結果となった。

### 8.2.3 緩衝材の流出に関する検討

#### (1) 緩衝材表面近傍の止水性に関する室内試験

本事業では、放射性廃棄物地層処分施設が再冠水する際に、地下水が緩衝材に浸潤して行く過程で発生する事象のうち、緩衝材表面近傍の止水性能評価に着目し、各種試験を実施した。

以下、各試験により得られた結果をまとめた。

##### 1) 小型セルによる緩衝材流出試験

- ・ 透水係数が $1 \times 10^{-10}$ m/s程度の花崗岩製のセルと、 $3 \times 10^{-8}$ m/s程度のイットリア安定化ジルコニアを用いたセルを用いて流出試験を実施した。その結果、送水圧が高い状態が持続することはなかった。また、試験中に多孔質セルから緩衝材や通水液がしみ出てくるような現象も観察されなかった。総流量とエロージョン質量の関係もアクリルセルを用いた場合の結果と同等であった。
- ・ 今後、プレハイドレーションなどの効果について、多孔質セルとアクリルセルでは相違がある可能性があるため、今後の更なる検討が必要である。

##### 2) 水みちの断面積と流速・乾燥密度の関係取得試験

流出現象をモデル化して評価するために、流出時に形成される水みちの断面積を緩衝材の乾燥密度、流量をパラメータとして取得した。これまでの検討に基づいて、乾燥密度1.6Mg/m<sup>3</sup>と流量0.1L/minを基本として、流量0.1L/minで乾燥密度を1.2、1.6、2.0Mg/m<sup>3</sup>とした場合と乾燥密度1.6Mg/m<sup>3</sup>で流量を0.001、0.01、0.1、0.5L/minとした場合について試験を実施した。



- ・ 流量が 0.1L/min の場合、緩衝材は、乾燥密度に依らず、通水初期は若干膨潤して断面積が小さくなるが、その後はエロージョンによって断面積が大きくなった。また、乾燥密度が小さいほど断面積が大きくなる（流出が激しい）傾向があることがわかった。
- ・ 乾燥密度が 1.6Mg/m<sup>3</sup> で一定の場合、流量が 0.001、0.01L/min では膨潤によって水みちの断面積は小さくなり、0.1、0.4L/min では断面積は大きくなる結果となった。
- ・ 試験結果を外挿して乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup> の緩衝材の流速毎の平衡値を求めると、ある程度の流速以上では水みちでの流速の平衡値はほぼ一定になることがわかった。
- ・ 流量が 0.1L/min の場合、ある程度乾燥密度以上では、水みちでの流速の平衡値はほぼ一定になることが分かった。なお、本試験では、機械的に試験時間を最大で 1 日として決定したため、平衡値を実験から求めることができなかった。今後、同様の手法で、長時間の試験を実施すれば、乾燥密度毎の限界流速を取得できると思われる。

### 3) 工学規模流出試験

エロージョン対策として、隙間にペレットを充填した場合の流出現象について蒸留水を用いて調べた。

- ・ ペレットのケースのエロージョン量と給水量の関係は、他のケースに比べ、同じ給水量に対してエロージョン量が多い。これは他の試験ケースに比べ、隙間の容積が小さいために、少量の給水量から流出が始まったためであると考えられる。逆に言えば、他のケースでは試験装置の隙間の容積が大きいため、隙間を水で満たす分に加えて隙間がある程度膨潤によって狭まり流速が増加するまでの間に給水された分だけ、流出開始までに必要な注水量が大きくなり、試験結果が右方向にシフトしたものと考えられる。
- ・ ペレットのケースは、他のケースに比べてエロージョン量と給水量の関係の勾配が緩く、緩衝材の流出に対する長期的な抑制対策としてペレット充填が効果的であることを意味している。
- ・ ペレットのケースの解体の結果、給水箇所のある箇所は乾燥密度が小さくなっていることがわかった。また、乾燥密度が低下している箇所は、飽和度の増加が顕著であり、概ね飽和している状況であった。
- ・ 無対策のケースに比べてペレット充填のケースの飽和度分布は、全体的に飽和度が低い。ペレット部分が水を含んで先に膨潤し、ブロックへの水の供給は、この膨潤したペレットを介して行われるためであると考えられる。ペレットを充填することで膨潤を非常に緩やか、かつ均等にする効果が期待できることがわかった。

### 4) 高水圧・低流量環境下での緩衝材流出試験

- ・ 実処分環境を模擬した試験条件を考慮し、二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するための試験を開始した。今後、試験結果によるが、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。

## (2) 地下研究施設における緩衝材流出試験

長期試験、Case1～Case3の試験結果を、以下にまとめる。

長期試験結果（緩衝材の初期乾燥密度  $1.9\text{Mg}/\text{m}^3$ 、試験体と孔壁間の  $2\text{cm}$  の隙間にはペレット充填せず、緩衝材上部に蓋は未設置）

- 緩衝材を蓋などによって体積拘束しない場合、注水流量が  $0.1\text{L}/\text{min}$  という低流量にかかわらず、緩衝材と孔壁の境界部で緩衝材の流出が生じた。
- 緩衝材の流出濃度と流出現象の関係は明瞭ではない。
- 緩衝材は冠水後 3800 時間（試験実施時間相当）で飽和度は 93%以上となった。
- 常時水と接してためゲル状となった緩衝材の乾燥密度は、いずれも  $1\text{Mg}/\text{m}^3$  よりも低い値であった。

Case1、Case3 試験結果（緩衝材の初期乾燥密度  $1.9\text{Mg}/\text{m}^3$ 、試験体と孔壁間の  $2\text{cm}$  の隙間にはペレット充填せず、緩衝材上部に蓋設置）

- 緩衝材を蓋などによって体積拘束した場合、緩衝材の流出は認められなかった。
- 緩衝材の流出濃度と流出現象の関係は明瞭ではない。
- 本試験条件での緩衝材の膨潤圧は  $0.8\text{MPa}\sim 1\text{MPa}$  程度で、圧力の発生は冠水後 100～130 時間経過後であった。
- 注水区間水圧は  $0.06\text{MPa}$  で安定し、増減することはなかった。
- 試験終了後の緩衝材の乾燥密度は、水と接触する機会が多い場所順（外側、内側、中央）に小さい。

Case2 試験結果（緩衝材の初期乾燥密度  $1.9\text{Mg}/\text{m}^3$ 、試験体と孔壁間の  $2\text{cm}$  の隙間にはペレットを充填、緩衝材上部に蓋設置）

- 緩衝材を蓋などによって体積拘束した場合、緩衝材の流出は認められなかった。
- 試験体と孔壁間の  $2\text{cm}$  の隙間にはペレットを充填した結果、緩衝材の変形が抑制された（ほとんど膨潤しなかった）。
- 試験終了後の緩衝材の乾燥密度は、外側、内側、中央で大きな違いはみられなかった。

### 今後の検討課題

- 緩衝材が膨潤し注水孔を閉塞した後に注入した水の移行経路を確認する。岩盤への逸水があるのかどうかを調べる。
- 緩衝材と孔壁間の隙間へのペレット充填方法を確立する。湿潤状態の狭い隙間にペレットを充填することは困難を伴うため、均質に充填する方法を確立することが必要である。
- 緩衝材の流出量と水圧、または注水流量の関係を明確にする。

## 8.2.4 再冠水時の緩衝材のモデル化・解析に関わる検討

### (1) 緩衝材施工品質に関する解析的検討

本年度は、平成 27 年度までの研究において、一般的な地下環境および幌延 URL350m 坑道の公開された水理データに基づいて構築した割れ目ネットワークモデルを用いて、処分場パネルを想定した坑道掘削の進展に伴う湧水量変化の評価を行った。処分場パネルをモデル化するため、複数の処分坑道を設定した割れ目ネットワークモデルを構築し、周辺の処分坑道等が各施工段階で処分孔の湧水量に与える影響を、定常の浸透流解析結果に基づいて評価した。具体的な実施内容を①～④に示す。

#### ① 坑道掘削・定置・埋戻しの順序の整理

坑道掘削・定置・埋戻しの順序の整理として、NUMO 殿より得られる情報等を参考に、操業期間中において緩衝材の品質に影響を与える湧水に関する情報を整理した。さらに、定量的指標としての基準値の具体的な算定方法についての数的根拠をまとめた。そのうえで、縦置き方式に絞って、掘削～定置～埋戻しの施工順序が湧水量の変化を与えるに影響を整理した。この検討結果より、H27 年度に作成した単一の坑道モデルを複数坑道のモデルに改良することによって、より現実的な検討が可能であると考え、②の検討を行った。

#### ② 複数の処分坑道が処分孔の湧水に与える影響

処分場パネルを想定した坑道掘削の進展に伴う湧水量変化の評価を行った。具体的には、実際の処分場パネルを想定し、5 本の並行する処分坑道をモデル化した「割れ目ネットワークモデル」を構築し、周辺の処分坑道が処分孔の湧水量に与える影響について、浸透流解析結果に基づいて評価した。

この結果、隣接する処分坑道をモデル化することで処分坑道 1 本あたりの湧水量は大幅に減少することが分かった。湧水量の算術平均を比較すると、単一坑道モデルと複数坑道モデルでの湧水量比は 49%であった。また、湧水量が 0.5L/min を超える処分孔の数も大幅に減少することがわかった。これは、複数坑道をモデル化することによって、湧水箇所が分散したことが要因と考えられる。

#### ③ グラウトの施工手順を考慮した処分孔湧水の評価

複数坑道モデルを用いて、グラウトによる止水対策のモデル化方法を検討し、止水対策前後をシミュレートした浸透流解析を行い、湧水量分布の把握および評価を行った。

止水対策のモデル化方法の検討では、透水性をグラウト施工後 1Lu 相当になるように低減率を設定することで、湧水量が多い処分孔においてより大きな湧水低減効果が得られる、実際の止水対策に近い形でのモデル化を行った。

次に、このモデルを用いた浸透流解析を実施し、処分孔や処分坑道への湧水量に与える隣接坑道や処分孔の影響を評価した。この結果、透水性割れ目の分布に応じた湧水の回り込み現象が確認された。ただし、止水対策による処分孔湧水の増加量は減少量の約 2 割程度と少なかったことから、全体としては、止水対策による湧水量の低減効果が示された。

#### ④緩衝材の定置後における処分孔への湧水量の推定

処分孔に緩衝材が定置された後の処分孔の湧水量（通過流量）に関する解析を行った。本年度は緩衝材領域の割れ目ネットワークモデルを構成しているパイプの透水性を、所定の緩衝材の透水係数相当になるよう引き下げる簡易的手法により埋戻しのモデル化を行った。この結果を対象領域の処分孔掘削前の岩盤と比較すると、緩衝材領域の透水係数の設定値の低下に伴い、通過流量が減少するとともに水圧が上昇する現象が確認できた。

#### (2) 再冠水時の緩衝材の挙動のモデル化の検討

これまでに行ってきた再冠水挙動に関する試験結果を基に、「解析技術への反映」と「工学技術への反映」という二つの視点で、モデル化の検討を行った。対象とした挙動は以下の5つである。

- ・緩衝材への地下水浸潤状況の評価
- ・施工品質（密度差）が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響
- ・浸潤による間隙空気の移行
- ・Ca型化が緩衝材に及ぼす影響
- ・緩衝材の流出に関する検討

それぞれに関して、施工に関する考え方、あるいは力学的視点に立っての考え方を示した。これらについては、試験の進捗に従い、更新を繰り返してきており、学会への発表や、論文としての発表を行っているものもあるが、昨年度までは反映する段階には至っていなかった。今年度、第6章の6.3（本項(3)）、及び6.4（本項(4)）で「緩衝材への地下水浸潤状況の評価」で得られた結果を解析的な検討に反映して、手法の妥当性の検討を行い、解析結果からモデルの妥当性を示している。また、第7章では、試験結果を基に施工方法を考える上での知見の十分性を評価する試みを行った。

来年度、試験終了までのデータを取り込み、得られた力学モデルを示し、解析への反映の例示と結果を反映した施工方法への提言を行い、これまでの結果の評価とともに、残された課題を整理する。

#### (3) 再冠水時の緩衝材の挙動に関わる力学解析手法の検討

本研究では、過去に実施されたベントナイト緩衝材の室内試験を対象とし、再冠水過程の緩衝材の状態を予測するための力学解析手法の検証を行った。シミュレーションの対象とした試験は、「密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響試験」、「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」及び「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」であり、ベントナイト緩衝材の不飽和弾塑性構成モデルと **Cozeny-Karman** 則を用いた不飽和透水モデルの適用性について、ケーススタディを実施した。

「密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響試験」のシミュレーションでは、直列に配置された乾燥密度の異なる二つ供試体が力のつり合いを満足しながら吸水過程を経て飽和状態に至るとき、二つの供試体の乾燥密度差が解消することなく残留するという実験事実を解析シミュレーションでも表現できることが示された。

「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」のシミュレーションでは、乾燥密度

が同一となった二つの供試体であっても、その乾燥密度を実現するに至る応力履歴が異なっていれば応力の再配分によって新たな変形が生じ、乾燥密度の差がもたらされるという実験事実を解析シミュレーションでも表現できることが示された。いずれの解析シミュレーションにおいても、このような密度差を表現するにあたっては、飽和化過程で変化する側方応力を構成関係に陽な形で考慮に入れることが重要であることが示唆された。

「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」のシミュレーションを行い、試験結果から得られる浸潤フロントに注目しながら、不飽和透水係数に影響を及ぼす **Mualem** 係数と初期サクション値について、ケーススタディを実施した。試験より得られる浸潤フロントの経時変化を概ね良好に表現できる **Mualem** 係数と初期サクション値の組み合わせが同定された。

#### (4) 緩衝材の浸潤に関する解析手法の適応性の検討

本検討は、解析ツールとして **COMSOL** を適用した場合の緩衝材の解析に関する調査である。本検討は **SKB International** によって行われた。**SKB** で行った試験を対象とした解析では、緩衝材内部に模擬廃棄体を置き、熱を発生した場合の緩衝材飽和についての解析を行っている。**THM** の連成解析であり、**COMSOL** の連成解析への適用性を示す結果である。

もう一つの解析例は、前項の **DACSAR** で対象とした試験と同じ、「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」のシミュレーションである。試験で得られた毛細管現象と同様の挙動を示すカーブを再現することができた。また、空気中の蒸気圧の効果を考慮することにより、再現性はさらによくなっており、この結果は、一次元浸潤速度取得試験のモデル試験としての妥当性も示している。

#### 8.2.5 緩衝材施工方法に関する調査

本調査では、まず、本事業でのこれまでの成果に加え、包括的技術報告書の 2016 年の **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の資料や原子力学会での発表論文等について、緩衝材機能に係わる最新の情報を調査、収集し、緩衝材の設計、及び施工の観点で情報を整理した。

また、総合的評価のための方法の検討と課題の整理においては、**JAEA** や **NUMO** で取りまとめられた緩衝材の仕様等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、スウェーデンの **SR** 報告書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。**NUMO** の外部専門家ワークショップの資料では、安全機能に係わる設計要件やそれらを満足する緩衝材の仕様範囲等が提示されている。この仕様範囲等を考える上での緩衝材のデータ整理の基軸は有効粘土密度が採用されており、緩衝材ブロックについては施工面（製作可能性）での制約も考慮されている。

この設計要件については、各々が独立した要件ではなく、相互に影響を及ぼすものであることに留意が必要であり、またこれまでの成果に整理された知見にもある「膨潤後の密度差の残存」も含め、不飽和から飽和に至る期間に緩衝材の性能に与える要因（乾燥密度、流入量、地下水組成、緩衝材成分、隙間、浸潤速度等）なども設計要件に加えた方がよいように思われる。また、例

えば設計要件の一つとしている低透水性の指標は「ペクレ数」とされているが、SKBでは「乾燥密度」とされており、より適切な指標を検討する必要があると思われる。

主命題「要求性能を満足する緩衝材が構築できること」を満足するための考え方をロジックツリーとして表現することができた。さらに、主命題の信頼性を向上させるための分析（感度解析）を行い、「設計仕様を満足する施工方法の開発」や「設計要件を満足する仕様範囲の提示」、「緩衝材の施工に適した場所の確保方法の開発」、「処分孔（坑道）からの排水方法の確立」などが優先度の高い研究課題であることを明らかにした。

証拠に基づく意思決定支援理論 **Evidential support logic (ESL)**などを適用することにより、専門家の知見に基づき、上位命題に対する下位命題や証拠の重みを十分性というパラメータで表現した。活用すれば、現状の考え方や知見を整理することにより、同じ研究分野の専門家に加え、様々な研究分野間での情報共有を図る基盤を整備することができる。その結果、各項目の重要度を提示することが可能となった。また、末端の証拠の現状の信頼性を区間確率というパラメータで表現することにより、どの程度の知見やデータが現在存在するか、しないかなどを提示することができることを示した。

緩衝材研究を総括的に整理し、実際の設計基準、施工方法等に反映するために、今年度は情報の整理と評価手法の適用性について検討した。今後、総合的なとりまとめを行うにあたり、これらの検討の精度を上げ、研究の集約のために活用する。

< 添付資料 >



## <添付資料>

SKB による緩衝材の再冠水に関する研究に対するレビュー

## 目 次

1. Laboratory-scale experiments.....	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Seepage test.....	2
1.3 Small scale erosion test.....	3
1.4 Cross section of water channel during piping (New erosion test-1).....	5
1.5 Erosion under high feeding pressure control conditions (New erosion test-2).....	7
1.6 Large scale breakthrough and swelling tests.....	7
1.7 Breakthrough and swelling test.....	9
1.8 Engineering scale erosion test.....	10
1.9 SKB's conclusions and recommendations.....	12
2. In-situ erosion experiments in Horonobe test site.....	16
2.1 Introduction.....	16
2.2 Short-term water injection test in FY 2015.....	16
2.3 Long-term water injection test from FY 2015 to FY 2016.....	19
2.4 Two upgraded test holes FY 2016.....	20
2.5 SKB's conclusions and recommendations.....	22
3. Safety functions of the EBS.....	24
3.1 Safety functions of the buffer in KBS-3.....	24
3.2 Safety functions for horizontal and vertical configurations of KBS-3.....	29
3.3 Safety functions and technical design requirements in a Japanese HLW repository..	30
4. SKB's experiences on design of EBS.....	30
4.1 SKB experience.....	30
4.2 Recommendations.....	32

## 1. Laboratory-scale experiments

### 1.1 Introduction

#### (1) General

A starting point for this would be to go through all the experimental work that has been performed in the Bentonite Resaturation Project and characterize the activities to different objectives in an integrated approach.

It could be a good idea to use the NUMO's Safety Case / Comprehensive Technical Report 2015 as a foundation for future work. Of special interest are sections: 3. Design and engineering technology of GD, 4. Long-term post closure safety and 6. Technical reliability of GD. The SKB team has not yet had the opportunity to study NUMO's Safety Case.

Other important documents will be SKB's assessment of safety after closure of a KBS-3 repository in Forsmark, SR-Site (SKB 2011), where the reference evolution of the repository system is of particular interest, and the Buffer Production Report (SKB 2010). Based on the reference evolution from SR-Site the following processes should be of interest for the Bentonite Resaturation Project:

- Piping erosion
- Homogenisation after loss of bentonite mass
- Saturation of buffer and backfill
- Moisture redistribution in dry rock case
- Application to hydraulic conditions at a given site
- Buffer and backfill homogenisation
- Buffer upward expansion
- Movement of the canister in the deposition hole

One idea could be to sort the activities under the respective processes.

#### (2) Overview of the laboratory tests presented at the workshops

The tests in focus during FY1016 are:

- Seepage test: the purpose of this test is to study the water uptake in a (very) high column filled with buffer material. The degree of saturation, expressed as seepage and saturation fronts, is studied with electric conductivity measurements.
- Small scale erosion test: the performed tests are a continuation of the previous program on piping and erosion. The main objective of the current tests was to study the influence of a bentonite/granite interface on the piping and erosion phenomena.
- New erosions tests: the new tests will try to answer outstanding issues from the previous tests. The first test aim at measuring the size, or size evolution, of the generated piping channel. This will give an idea about the flow rate in the channel as well as an idea about the connection between initial dry density and resealing behaviour. The second test aims at studying the erosion behaviour under constant

pressure gradient conditions. The objective is to study the resealing behaviour in a system with an interface between a bentonite and a relatively permeable porous media. The third test type aim to study the breakthrough pressure as a function of swelling pressure.

- New breakthrough and swelling test: will be designed to measure both breakthrough pressure and swelling pressure.
- Engineering scale erosion test: a test that has been dismantled.

## 1.2 Seepage test

### 1.2.1 Design of test

2015

The 14th meeting on the saturation of bentonite

**Seepage test**

■ Evaluation of seepage rate into unsaturated bentonite

< Outline >  
Seepage of ground water in bentonite was simulated under one dimensional seepage conditions to measure the seepage rate experimentally.

This long cell has 39 electrodes at intervals of 25mm. The location of the seepage front was measured by variation of resistivity.

< Detail drawing of test apparatus >

SKB, RWMC and KAJIMA 6

Figure 1-1. Design of Seepage test (from presentation by Kajima 14th meeting on re-saturation of bentonite).

### 1.2.2 SKB's comments

This test has been running for more than six years now. There is a nice set of data available. SKB has made a first attempt to model this test and the results are discussed in section 5.3. The strength of this test is the long duration, the large scale (in the vertical direction) and the simple boundary conditions. Together with the modelling, it should be possible to evaluate and verify the permeability and the retention curve for the Kunigel bentonite for saline as well as for dilute conditions. This should make it possible to improve the precision of the modelling of the water uptake in a bentonite buffer in the performance assessment of a repository. However, the test is isothermal at room temperature. It could

therefore be worthwhile to consider experiments at elevated temperature to produce a complete data set.

The modelling shows that it will take a substantial amount of time to fully saturate this test. It is probably not reasonable to run the test to full saturation. A plan for decommissioning should therefore be developed. It would be very interesting to sample the material in the column and check whether the water content interpreted from the resistivity measurements agree with the actual values.

The increased feeding pressure has increased the velocity of the seepage front, especially in the case of saline water. This makes sense, since the hydraulic conductivity should be higher in the case of higher salinity.

It is somewhat surprising that the increase in feeding pressure has no effect whatsoever on the measured total stress. However, the pore pressure in the test is most likely very low and the increase in feeding pressure has not affected the pore pressure yet.

### 1.3 Small scale erosion test

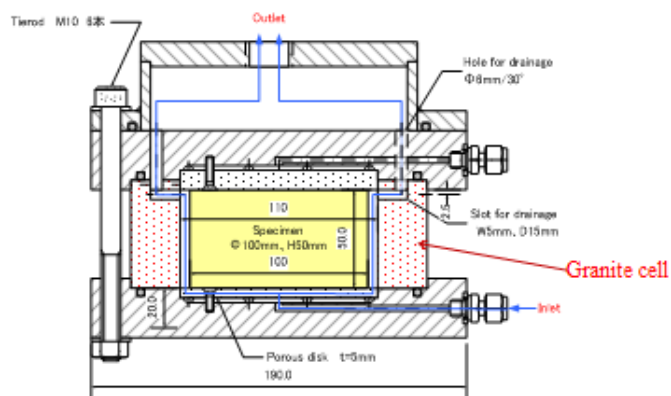
#### 1.3.1 Design of test

##### Small scale erosion test

2016  
The 14th meeting on the saturation of bentonite

Conventional tests on the convergence of water channel were conducted using acrylic resin cell.

The convergence of water channel was investigated using granite cell.  
Hydraulic conductivity of the granite was approximately  $5 \times 10^{-12} \text{m/s}$



SKB, RWMC and KAJIMA

11

Figure 1-2. Design of Small scale erosion test (from presentation by Kajima, 14th meeting on re-saturation of bentonite).

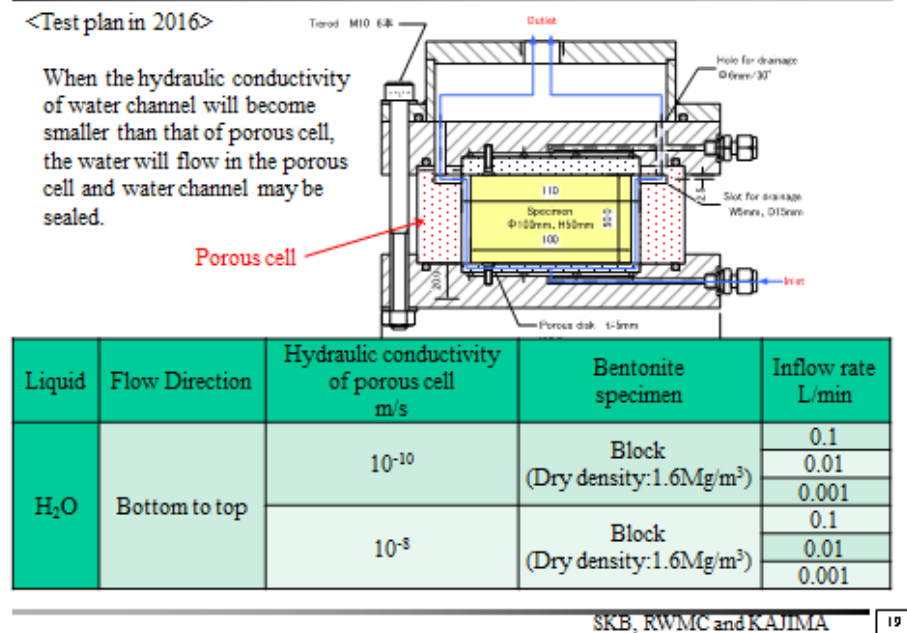


Figure 1-3. Design of Small scale erosion test using porous cell (from presentation by Kajima, 15th meeting on re-saturation of bentonite).

1.3.2 SKB’s comments

The results are fine and data follow the line from previous tests nicely. The results have another exponent compared to SKB’s experiments (MX-80). This is puzzling and, if possible, it would be very interesting if the test was repeated with another bentonite. This would resolve if the exponent is dependent on the material or on the experimental setup.

A lot of water has been fed into test and lot of material has been lost – way too much if this was the situation in a repository. If the loss is above 10% – it may be another mechanism than piping and that could cause a different mass loss mechanism. The data seem to indicate a changing trend at a loss of ~100 g.

The feeding pressure (60 kPa) indicates clogging of channel in the experimental setup.

The results from this interface test are rather different from the ones that were performed in 2010. It is clear that the properties of the granite are important. In the old tests the water took the path through the granite, while a pipe in the bentonite was formed in the current test. It will therefore be very interesting to see the results from the new test with the permeable material.

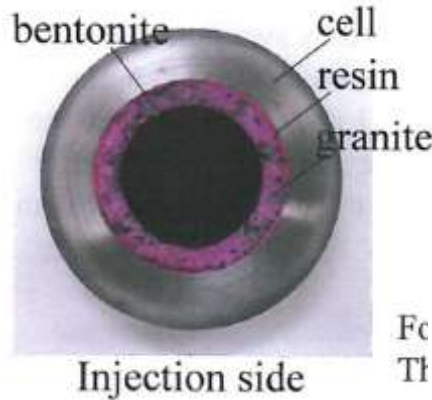


Figure 1-4. Test for breakthrough phenomena. Bentonite and granite cell (RWMC-Kajima progress report 24 Jan 2011).

The results from the new tests with the porous cell are very interesting. It is clear that a pipe forms in the bentonite even at the lowest inflow rate and that the average hydraulic conductivity of the bentonite sample always is higher than  $10^{-8}$  m/s. It would be interesting to see what would happen if the inflow was turned off for a few days and then restarted. Would that give the bentonite sufficient time to seal?

#### 1.4 Cross section of water channel during piping (New erosion test-1)

##### 1.4.1 Design of test

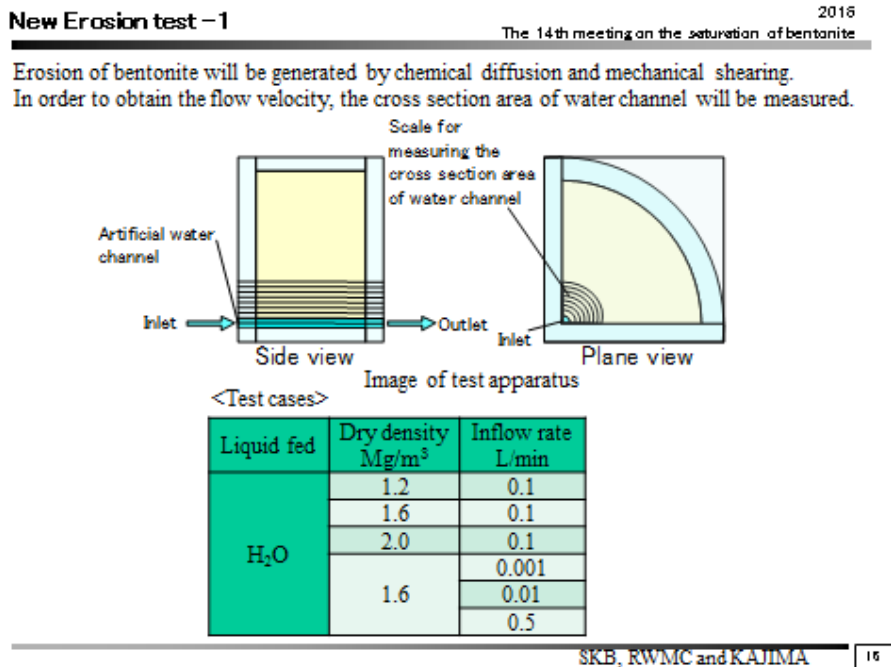


Figure 1-5. Design of New erosion test-1 (from presentation by Kajima 14th meeting on re-saturation of bentonite).

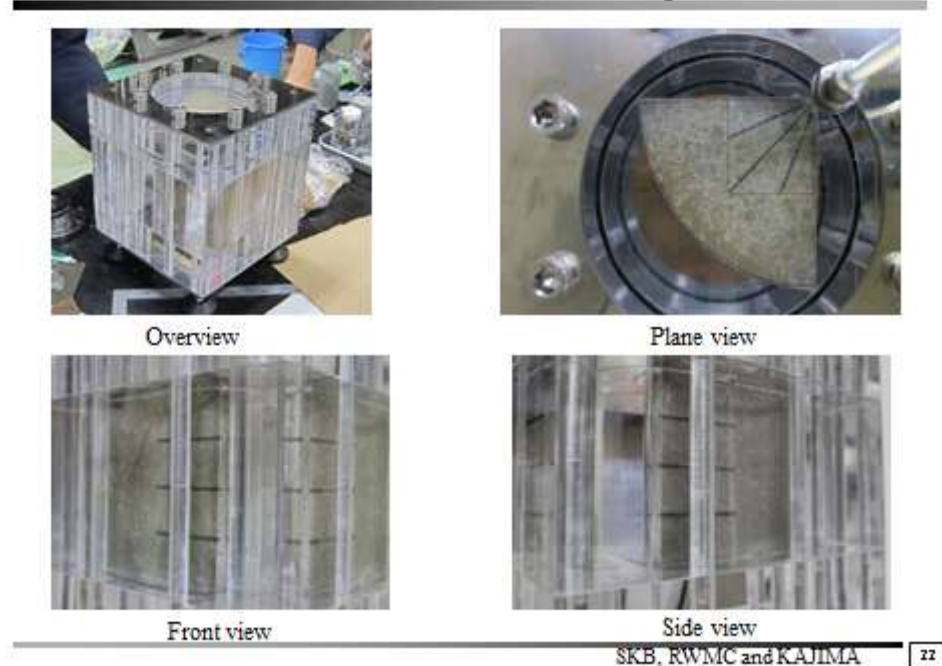


Figure 1-6. Photos of test apparatus (from presentation by Kajima 15th meeting on re-saturation of bentonite).

#### 1.4.2 SKB's comments

Erosion generated by chemical diffusion is true only for distilled water and is not realistic in the early evolution in a repository. SKB recommends using tap water or water from a site, not distilled water, to get erosion conditions realistic for a repository. Distilled water will introduce another erosion mechanism, which will make the experiments difficult to interpret.

The shear mechanism is important at high water flow rates. At low flow rate self-sealing should be stronger and shear smaller.

The determination of flow velocity in the pipe is both interesting and important. The data could lead to a better conceptual understanding of the erosion/resealing process. It could be a good idea to discuss this more in detail at the next meeting.



1.5 Erosion under high feeding pressure control conditions (New erosion test-2)

1.5.1 Design of new test

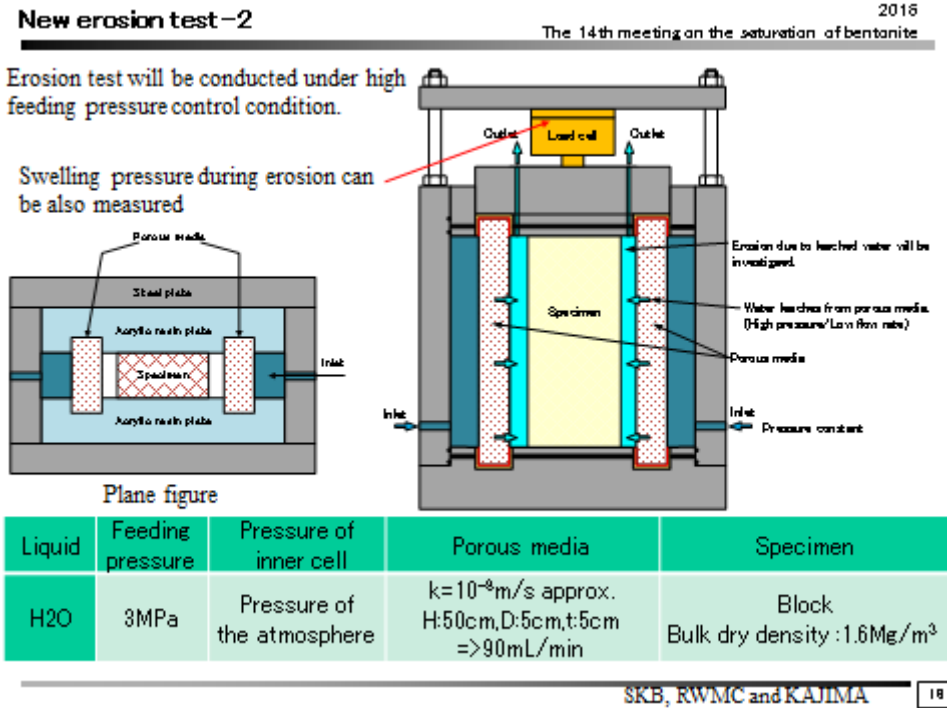


Figure 1-7. Design of New erosion test-2 (from presentation by Kajima 14th meeting on re-saturation of bentonite).

1.5.2 SKB's comments

Considering the new proposed laboratory test of erosion there is a risk that a short flow path is created between the water filled filter and the outlet from the test. The new erosion test should be modified so that the filter does not extend all the way to the top of the experiment. It could be questioned if the proposed feeding pressure of 3 MPa is too high. The maximum swelling pressure of the bentonite will be in this range or lower and there may be risk of fracturing of the bentonite. The value is relevant for a repository, but there the pressure increase will be slower than in the experiment.

1.6 Large scale breakthrough and swelling tests

In 2012, Kajima constructed the quarter of the mock-up ring buffer materials by SHOTCLAY method. After saturation, the lid of the steel cell was removed and break through test was conducted.

### 1.6.1 Design of test



Figure 1-8. Design of the test (from presentation by Kajima15th meeting on re-saturation of bentonite).

### 1.6.2 SKB's comments

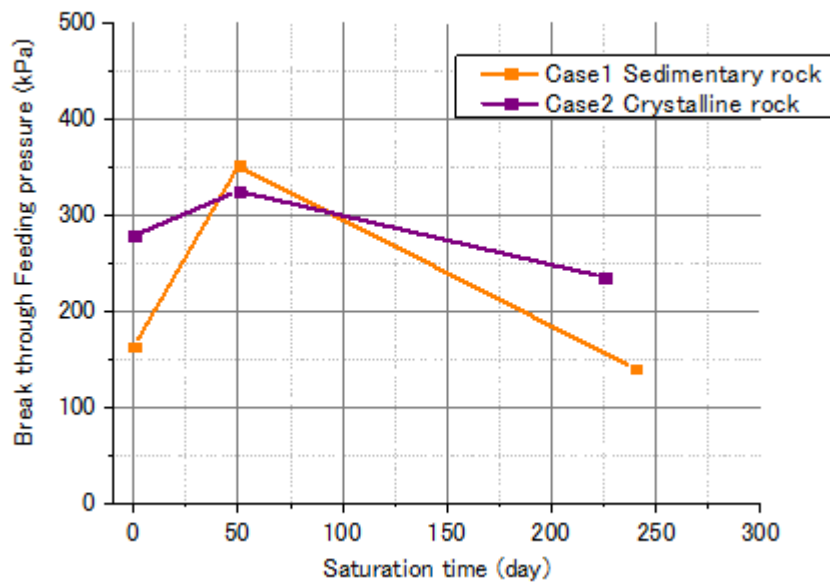


Figure 1-9. This figure shows Break through feeding pressure and saturation time relation. In the first stage of the test, break through pressure increased with increasing of saturation time. But in the last stage of the test, break through pressure decreased (from presentation by Kajima15th meeting on re-saturation of bentonite).

The decrease in breakthrough pressure (see Figure 1-9) could be caused by several reasons:

1. Ion-exchange from Na-montmorillonite to Fe-montmorillonite, this would lead to a lower swelling pressure locally and could give a lower breakthrough pressure. However, the concentration of Fe(II) in solution is normally very low, which would limit the extent of the ion-exchange process.
2. Build-up of corrosion products in the interface between the vessel and the bentonite. A layer of corrosion products could potentially form a preferential pathway for the water.
3. Redistribution of stresses within the bentonite. The outer part of the bentonite will take up water first, which will yield a high swelling pressure on the interface between the bentonite and the vessel wall. After some time the degree of saturation will be more homogenous which actually could lead to a temporary lower swelling pressure at the interface. Was the swelling pressure monitored in the test?

In the pictures, a corrosion zone can be seen, which indicates that #2 above could be a possibility.

#### 1.7 Breakthrough and swelling test

Based on results from the test in section 1.6, break through pressure and swelling pressure will be measured at the same time.

##### 1.7.1 Design of new test

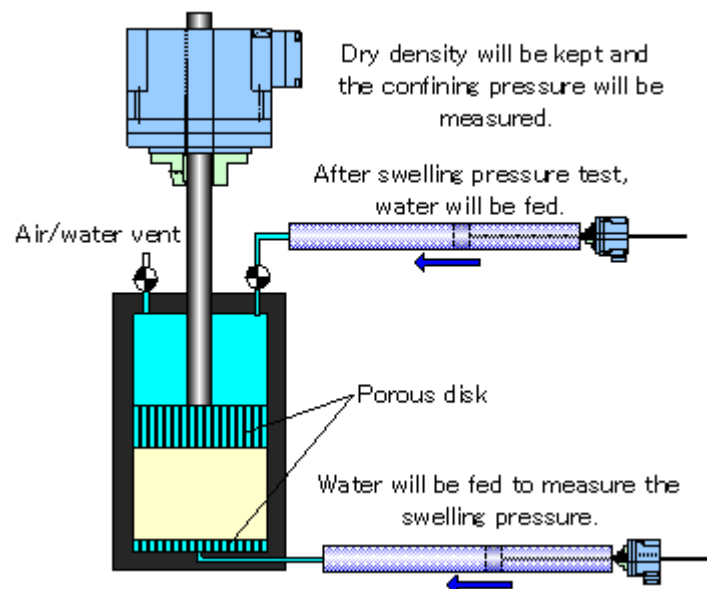


Figure 1-10. Design of Break through and swelling tests (from presentation by Kajima 14th meeting on re-saturation of bentonite).

### 1.7.2 SKB's comments

To SKB it is a little unclear what type of information the experiment actually will provide. This, however, should not be taken as a discouragement; we are still very interested to see the actual results. A recommendation is to circulate the water in the bottom filter to get known water chemistry. This is what SKB do in similar tests. With only a single pipe, the water composition in the filter will be strongly influenced by the bentonite and the swelling pressures will be difficult to interpret.

### 1.8 Engineering scale erosion test

The purpose of these tests is to check whether there are potential countermeasures for the piping/erosion process. It was dismantled in this year.



*Figure 1-11. Design of the apparatus (from presentation by Kajima 15th meeting on re-saturation of bentonite).*

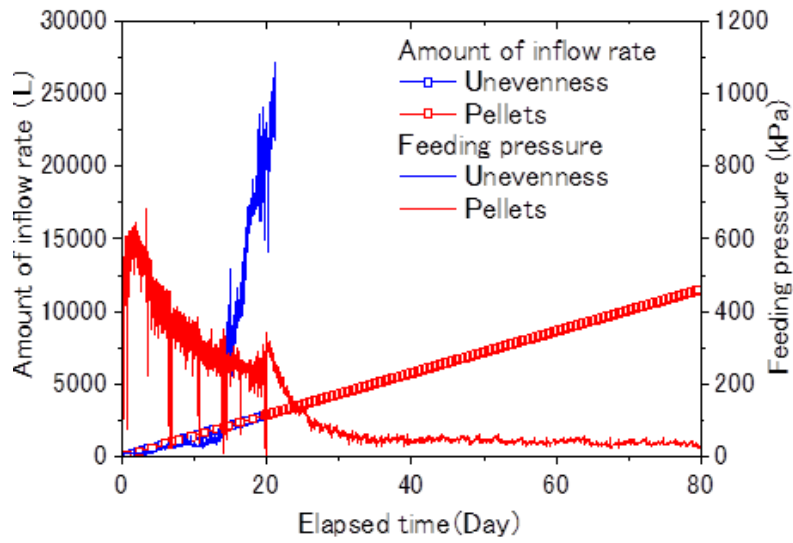


Figure 1-12. Feeding pressure and inflow as a function of time (from presentation by Kajima15th meeting on re-saturation of bentonite).

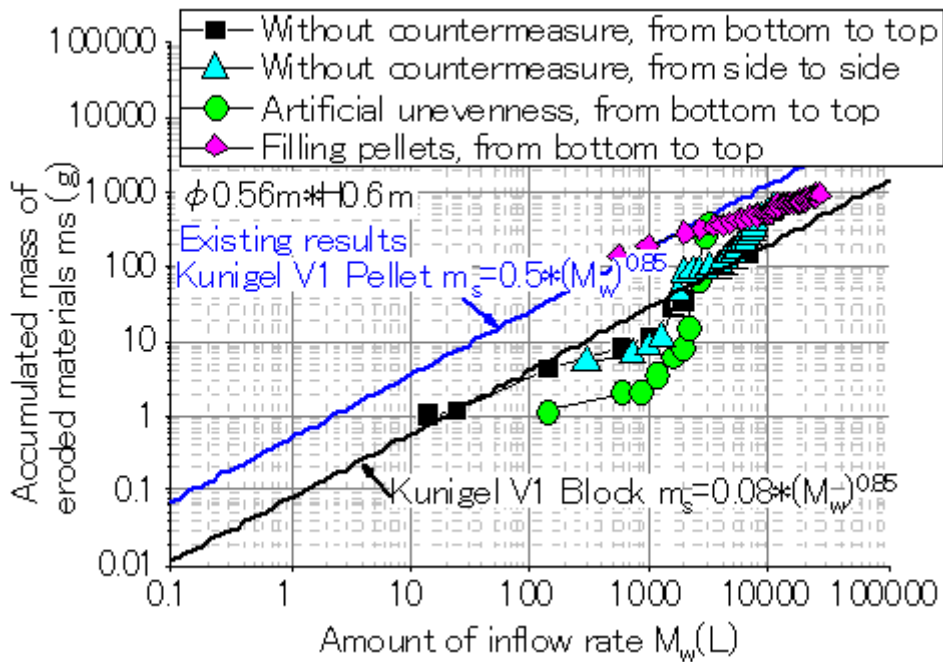


Figure 1-13. Mass of eroded material as a function of accumulated inflow (from presentation by Kajima15th meeting on re-saturation of bentonite).

### 1.8.1 SKB's comments

The engineering scale erosion test shows that both pellets and artificial unevenness has the potential to affect the piping process. Inclusion of pellets leads to a rapid pressure

build-up in the experiments. The pellets are however not able to withstand the pressure increase and a channel is eventually formed and the pressure drops. The artificial unevenness, on the other hand, is able to totally close the system. The main problem with the artificial unevenness is that a few cubic metres of water have passed through the test before the sealing becomes efficient. This means that neither pellets nor artificial unevenness alone has the potential to serve as a countermeasure for piping. However, both concepts have promising features and could be further developed. For example, a combination of pellets, to reduce the voids and unevenness, to stop the flow, may be more efficient.

## 1.9 SKB's conclusions and recommendations

### 1.9.1 Lessons learned

It is very clear that the Bentonite Resaturation Program is progressing steadily and much new knowledge is gain. This is especially true regarding the piping and erosion process.

### 1.9.2 Next step and identification of potential gaps

Based on the presentations by RWMC it is clear that this project is moving from a research and a development phase to an application phase. The results obtained have to be used to meet the expectation from the buffer material study in the METI project. The overall objectives of this study are:

- To propose buffer density (range or lower limit) at construction
- To propose countermeasures for ensuring buffer quality

A key aspect to consider in meeting these objectives is the fact that significant inflow of water into an open repository needs to be considered for a site in Japan.

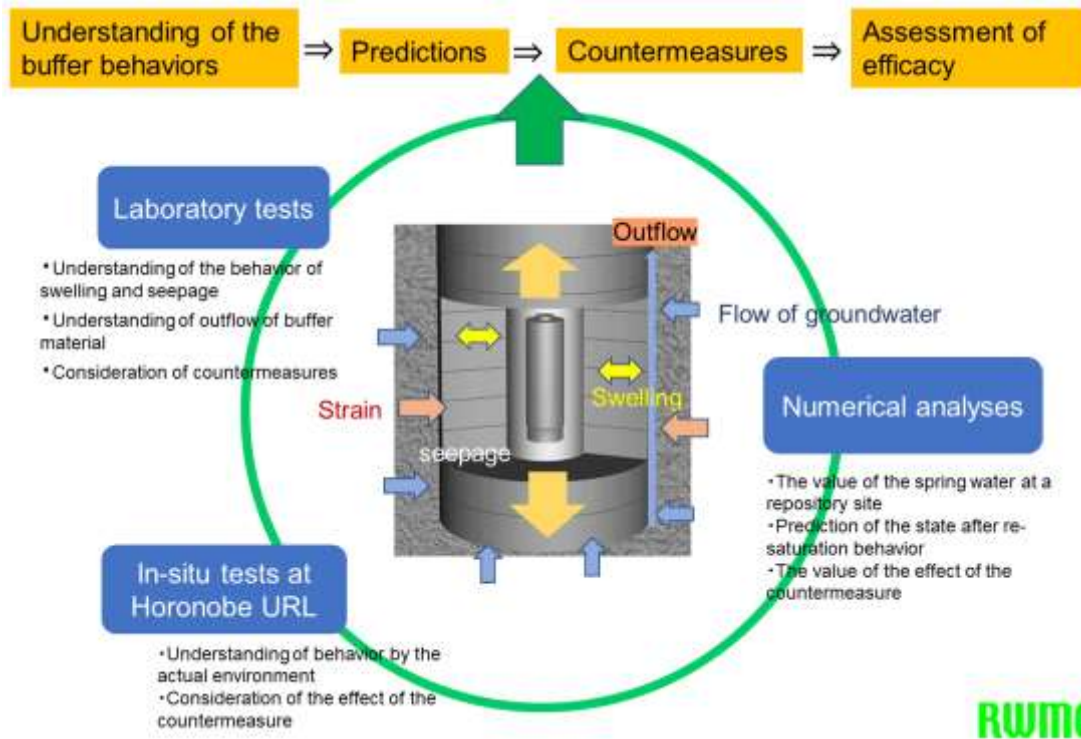


Figure 1-14. The strategy for the current RWMC work (from presentation by RWMC 15th meeting on re-saturation of bentonite).

Figure 1-14 illustrates the strategy for the current RWMC work. The figure in the middle illustrates the buffer component in the repository together with the factors that will determine the early evolution. The figure also illustrates how the different activities in the project are used to strengthen the knowledge base and the predictive capability.

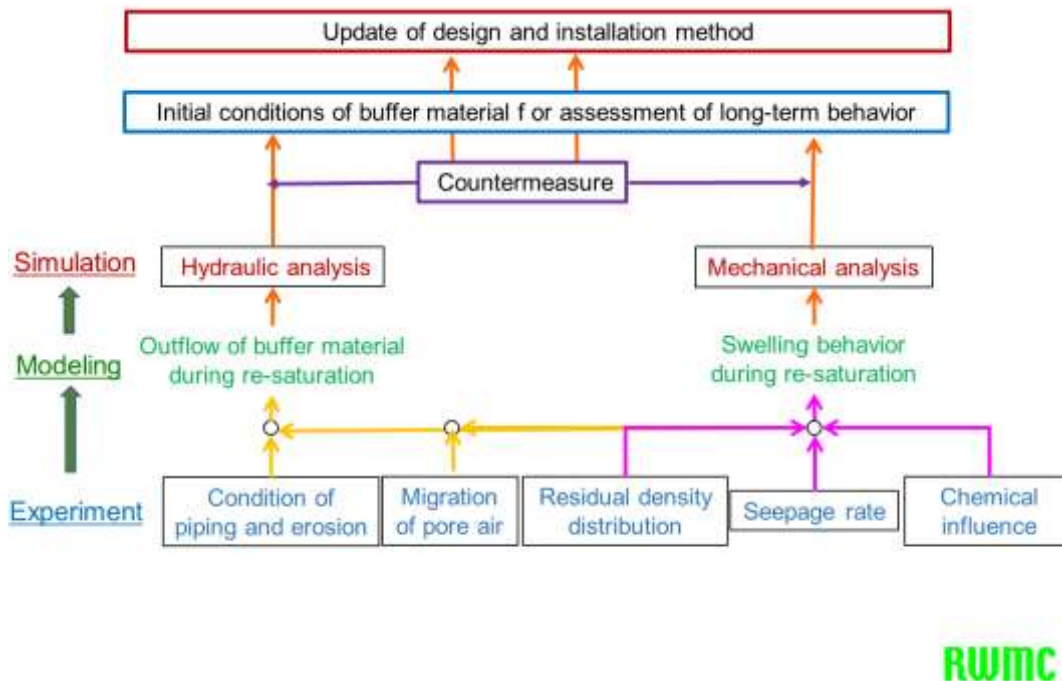


Figure 1-15. The details of the upper yellow line in Figure 1-14 (from presentation by RWMC 15th meeting on re-saturation of bentonite).

shows the details how the different processes will affect the properties of the barrier and how the experimental activities performed will support modelling of individual processes and eventually simulations of the repository system.

SKB strongly supports this approach and are very happy to see that RWMC has made an effort to integrate the experimental work into a structure where it can be used to evaluate repository performance. It is also crucial for the success that modelling activities now are a part of the project.

The properties needed to ensure basic barrier function is defined by NUMO (Safety of the Geological Disposal Project 2010, NUMO-TR-13-05) and are summarized in Table 1-1. These properties are defined at a high level and no quantitative limits are given here.

A form of quantification the dry density requirement can be found in Figure 1-16.



Table 1-1. The properties needed to ensure basic barrier function.

Safety functions		Technical requirements	Description of the technical requirements
Retardation of nuclide migration	Restriction of migration by advection	Low permeability	Restrict groundwater flow (advection) in the buffer to restrict the migration of radionuclides
	Prevention and restriction of colloid migration	Colloid filtration	Restrict colloidal migration of radionuclides
	Retardation of nuclide migration by sorption	Sorption capability	Retard migration of radioactive materials leached from the glass by sorption

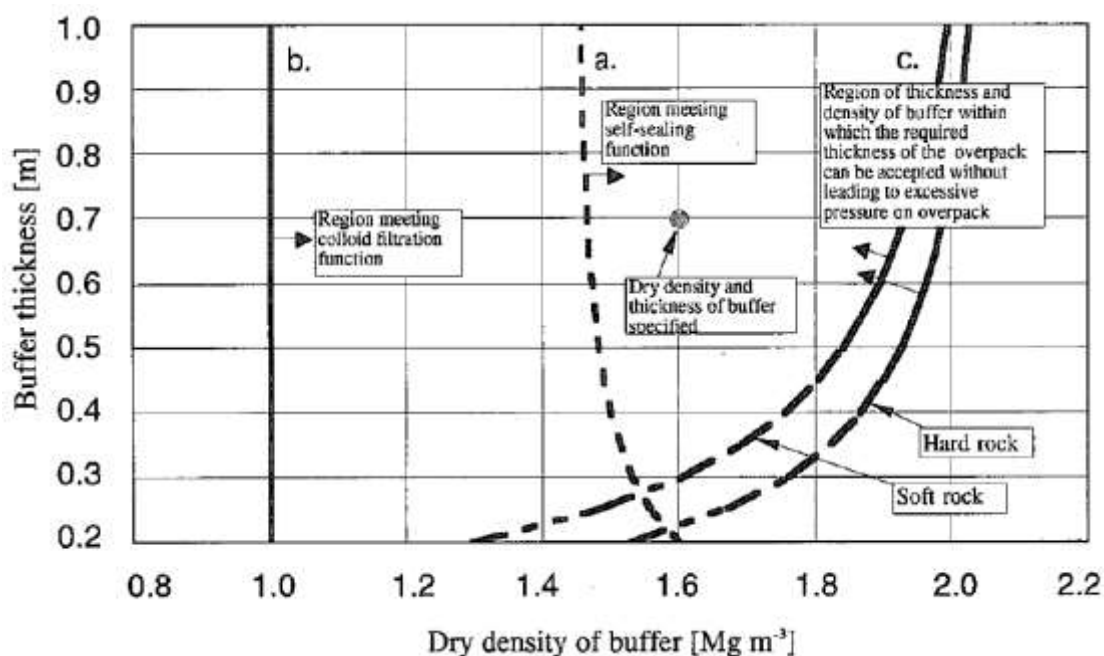


Figure 1-16. Relationship between buffer thickness and density for satisfying the design requirements (block system, after swelling) (Second progress report on research and development for the geological disposal of HLW in Japan, JNC, 1999)

This figure gives the general idea and does not set very strict requirements. The dry density of the buffer material should be at least  $1.475 \text{ Mg m}^{-3}$  and should not exceed  $2.0 \text{ Mg m}^{-3}$ . A thinner buffer thickness gives stricter requirements, but an increase above the specified value of  $0.7 \text{ m}$  does not significantly change the density requirements.

The installation of a buffer that could meet these long term requirements would most likely be straightforward in a rock without any water inflow. However, since significant water inflow can be expected during buffer installation and early evolution in repository in

Japan, this factor has to be considered in the near-field design and the consequences need to be evaluated in the performance assessment and design analyses.

The basic question is: what will the buffer look like when the hydraulic gradients in the repository are restored after closure/partial closure? To answer this number of issues need to be resolved:

1. What is the optimum buffer design? This will be dependent on the rock type and inflow conditions and needs to be iterated with performance assessment and design analyses
2. For a given design, how homogenous will the installed buffer be? What will be the relation between blocks, pellets and potential voids in the system?
3. How much buffer material will be lost/re-distributed from piping and erosion during the period of high gradients?
4. With those questions answered it will be possible to model the buffer homogenisation and determine if the final state of the buffer will meet the requirements.

The results from studies in the Bentonite Resaturation Projects can be used to resolve issue #3 and will also aid the modelling in #4. The studies of counter measures will aid the evaluation of the optimum buffer design.

One issue that not has been treated in the current project is the effect of temperature on the processes. This is most likely of minor concern for the piping/erosion process, since piping will take place in the outer part of the buffer where the temperature always will be relatively low. Temperature will however affect the water uptake and resaturation, and may directly or indirectly affect the homogenisation.

## 2. In-situ erosion experiments in Horonobe test site

### 2.1 Introduction

During the last couple of years RWMC has conducted a number of in situ tests of erosion in the Horonobe test site. The first tests conducted were basic but the knowledge has grown quickly and with the latest planned tests RWMC has taken important steps towards understanding and describing the piping and erosion processes.

### 2.2 Short-term water injection test in FY 2015

The objective of these tests is to determine the conditions under which piping-erosion occurs.

The tests were performed in the following sequence:

- 1) Assuming a buffer material after swelling  
⇒ Dry density 1.6 Mg/m<sup>3</sup>
- 2) Grasping the condition of the occurrence of piping  
⇒ Changing the water injection flow rate
- 3) Confirmation of self-repair of buffer material  
⇒ Submerging in the water.

- 4) Confirmation of the flow path of the piping
  - ⇒ Observation of buffer material pulled up from the test hole
- 5) Confirmation of the swollen state of the buffer material
  - ⇒ Measuring dry density measuring of sampling cores
- 6) Grasping outflow amount of the buffer material
  - ⇒ Bentonite concentration analysis in drainage water

### 2.2.1 Design of test

The design of the test is presented in Figure 2-1.

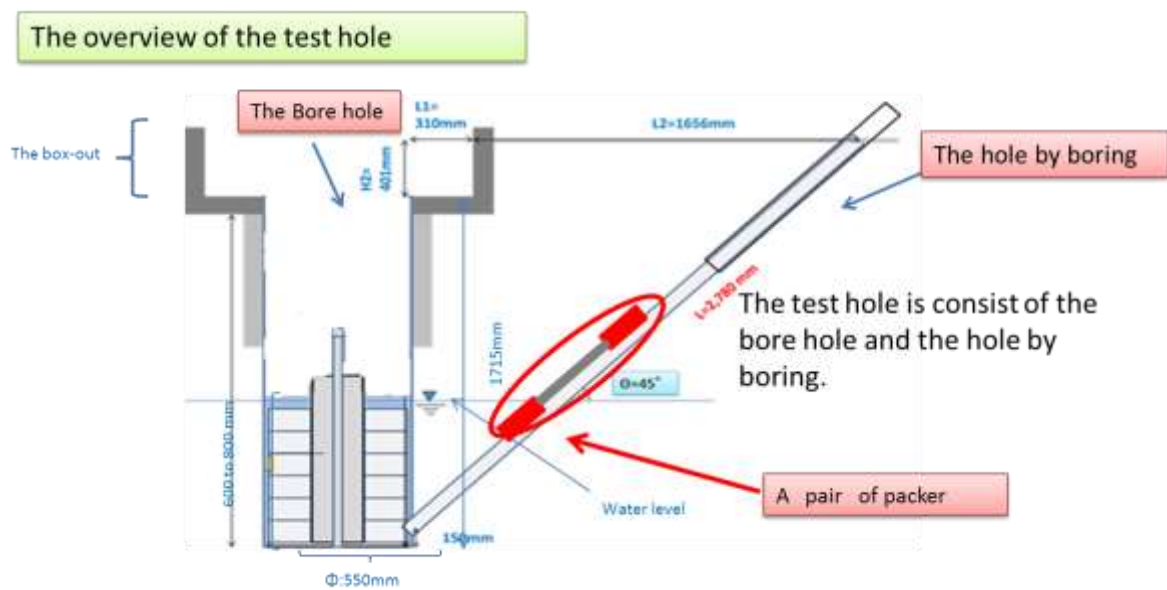


Figure 2-1. The design of the Short term water injection test in FY 2015 (from presentation by RWMC 14th meeting on re-saturation of bentonite).

When the packers were closed, the natural water flow into the borehole wall was 0.4 L/min. When the packers were opened, flow rate into the borehole was 2.0 L/min. The inflow to the test borehole was measured when the water level in the test hole was according to Figure 2-1.

For the first test, when the water flow rate was about 2.0 L/min, the piping-erosion phenomenon was confirmed by observing outflow water from the bottom of borehole through “Hole 1” as defined in Figure 2-2.

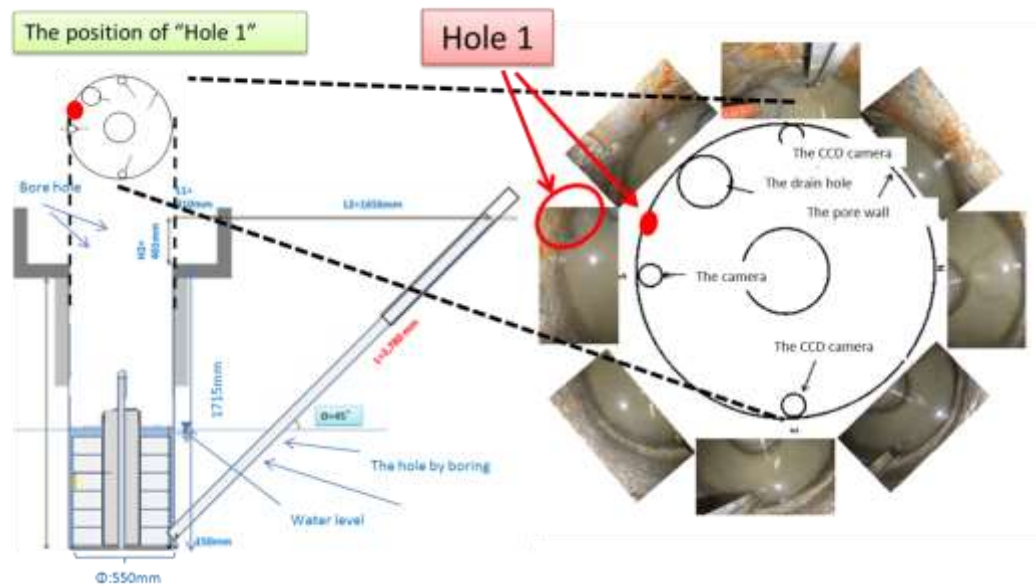


Figure 2-2. The location of the piping hole in the test set up (from presentation by RWMC 14th meeting on re-saturation of bentonite).

When a tracer colour was added to borehole adding water to the test it could be observed flowing out from the pipe marked Hole 1 in Figure 2-2.

In the second test water was injected through the injection borehole intercepting the test hole. The flow into the test hole was controlled and the resulting water pressure was measured. The inflow rate was gradually increased from 0.05 L/min to 1.1 L/min. Up to 0.3 L/min the pressure in the injection borehole increased as the flow was increased. At 0.3 L/min, corresponding to injection pressure of about 40 kPa, the injection water ratio started to gradually decrease which was interpreted as a piping channel expanding and letting more water pass.

The density of the bentonite buffer was measured in 10 different locations. The density of the upper and lower part of the buffer was decreased.

## 2.2.2 SKB's comments

The test results are as could be expected and the result that the buffer can withstand approximately 40 kPa of water pressure before a clear piping phenomenon can be observed is interesting. I should be noted that the break though pressure of 40 kPa is valid for the current test set up. Test geometry, buffer material, degree of saturation and homogenisation together with the ground water chemistry will influence the breakthrough pressure. The initial properties of the pellet filling (granule size distribution including the amount and distribution of fines) may also influence the break through pressure. One more parameter that can increase the breakthrough pressure is the confinement of the

system. If a lid or a backfill supports the buffer from above the break through pressure may be higher.

The results considering buffer density are also logical.

To reach useful conclusions from the tests, the rock - buffer system as whole needs to be understood. According to “The hydraulic characteristics at the -350 m gallery in the Horonobe URL” there is an excavation damaged zone surrounding the tunnels with considerably higher permeability ( $10^{-6}$  m/s) than the undisturbed rock including natural fractures ( $10^{-9}$  m/s). The permeability of the rock matrix without any fractures is  $10^{-11}$  m/s. The Extension of the EDZ is about 20 cm, not exceeding 1 m. These hydraulic properties will have a major influence on the behaviour on the In-situ experiments in Horonobe as well as on the piping and erosion behaviour in full scale in the repository.

The Horonobe test is according to the above placed below the extension of the EDZ and the surrounding rock can be assumed to have a permeability in the order of  $10^{-9}$  m/s and hence the water from the injection borehole will determine the behaviour of the test. The EDZ in the upper part of the test hole has been grouted to stop water from the EDZ from pouring into the test hole.

In order to determine the erosion rate a lid on top of the buffer should be installed. The water from the test should be allowed to pass the lid so that the eroded material can be collected and be mass determined.

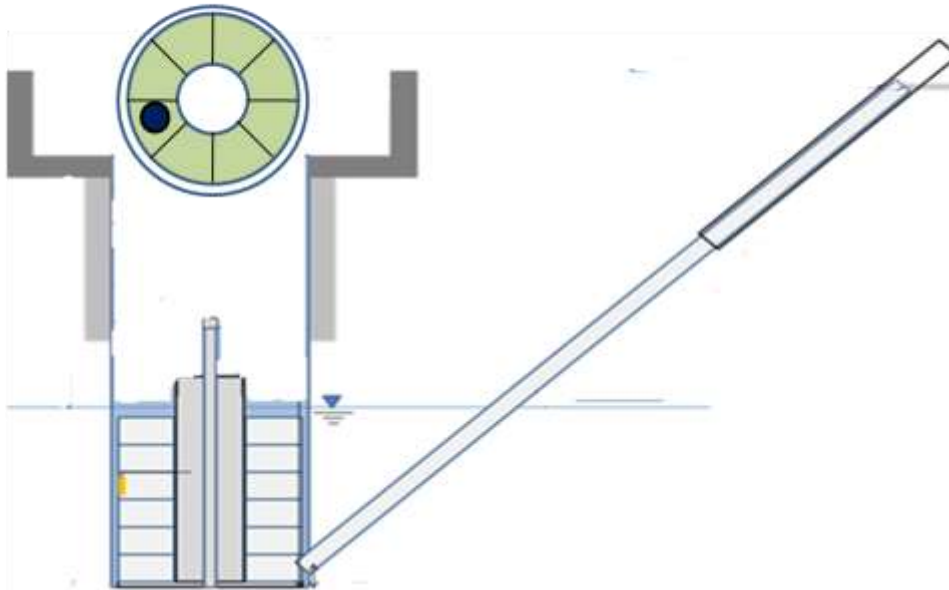
### 2.3 Long-term water injection test from FY 2015 to FY 2016

The objective of this test is to know the effect of the time for piping, not the water injection amount.

#### 2.3.1 Design of test

The test design is presented in Figure 2-3.

### The position of the drain



*Figure 2-3. The design of the Long-term water injection test (from FY 2015 to FY 2016).*

#### 2.3.2 SKB's comments

In order to follow the erosion rate with time (the concentration of bentonite in the erosion water) a lid should be introduced as described for further work. It is also important to have a good understanding of the natural water inflow from the rock and the feeding pressure for the water from the rock. Will the flow from the rock decrease or diminish as the bentonite starts to build up a counter pressure? The breakthrough pressure for piping is very similar to the short-term water injection test.

#### 2.4 Two upgraded test holes FY 2016

The first objective is to confirm the erosion phenomenon in the case of detained volume of buffer material

- Installing the lid on the buffer material
- To increase the accuracy of measurement of the buffer material concentration
- Measuring the swelling pressure of the buffer material

The second objective is to determine whether the countermeasure prevents the outflow of buffer material.

- Filling the pellets into the gap of buffer material and bedrock

### 2.4.1 Design of test

Two test holes have been upgraded for this year's test, see Figure 2-4. In Figure 2-5 the test set up for the new planned erosion test including a lid is shown.

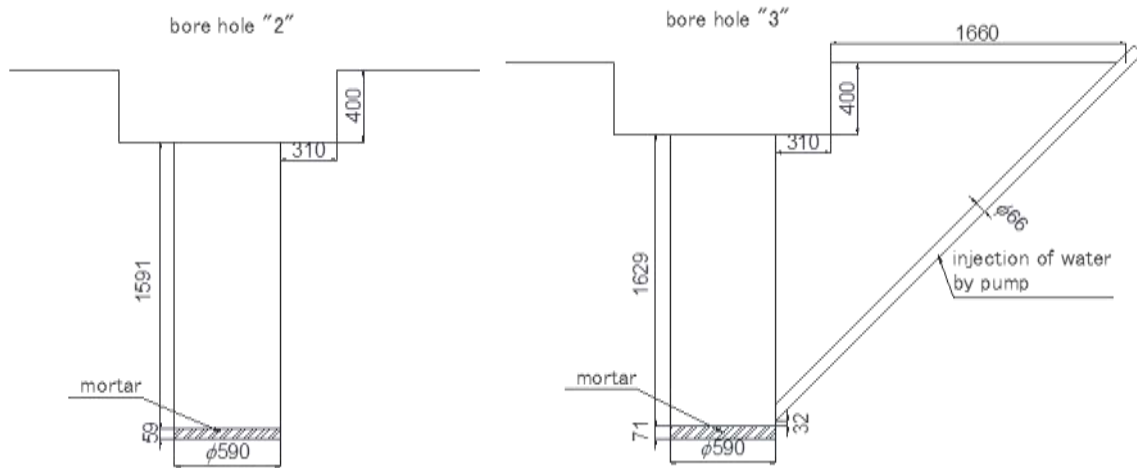


Figure 2-4. The two newly upgraded test holes (from presentation by RWMC 14th meeting on re-saturation of bentonite).

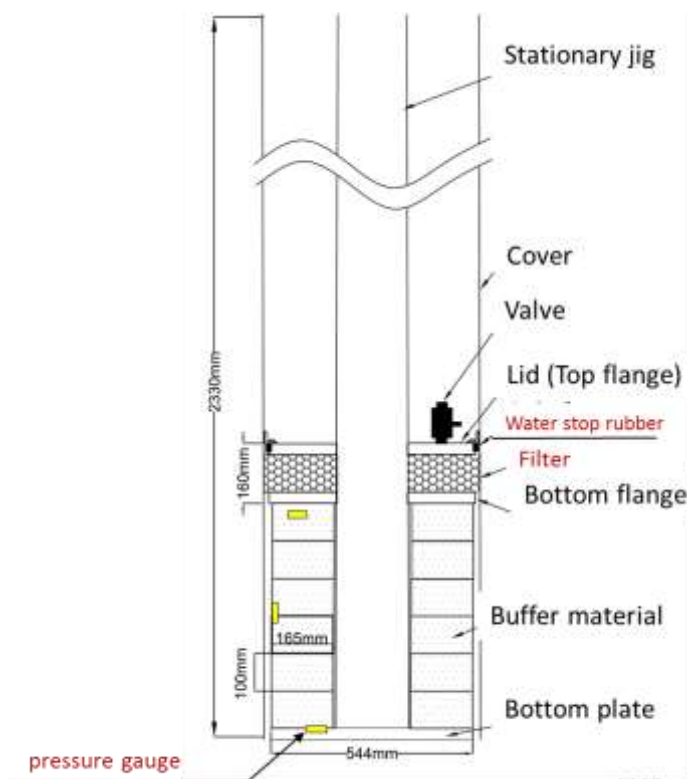


Figure 2-5. New test set up with a lid for confining the tests and making possible to measure erosion rate with time (from presentation by RWMC 14th meeting on re-saturation of bentonite).

## 2.4.2 SKB's comments

In general the new design of the new tests agrees well with SKB's earlier comments to include a lid in the coming tests.

However, a few suggestions regarding design can be made. The filter thickness and properties should be designed in detail. SKB's recommendation is to use a fairly coarse and thin filter. This would limit the amount of bentonite that can sediment within the filter. This way the erosion rate with time is possible to monitor while the water is still flows out of the system in a controlled way.

The function and design of the pellet fill were also discussed. The pellet fill should be optimized to allow water to pass rather than to achieve a high density. This way the erosion pipe may form in the pellets instead of in the sand bentonite blocks. The pipe in the pure bentonite of the pellet fill has much higher probability of sealing once the pressure gradient is gone.

The dismantling method was also commented. Since the volume of interest is close to the rock wall this should be dismantled with care so that possible piping channels and segregation can be studied. The possibility to take core drill samples during dismantling should be considered.

Considering the lid there are three options:

1. The lid should either be fixed not to allow movement while measuring the pressure.
2. The lid should be allowed to move in the vertical direction while measuring the displacement.
3. Apply a known fixed load on the lid and measure the displacement.

As commented before, it is important to understand the hydrogeology of the surrounding rock.

## 2.5 SKB's conclusions and recommendations

### 2.5.1 Based on status presented at workshop at Äspö, August 2016

RWMC has gained substantial practical experience on formulating objectives, setting up tests in an underground environment, running, controlling and evaluating results.

The first objective to measure the breakthrough of a piping channel for test specific conditions have been accomplished. Good understanding of the piping phenomena has been built up.

In the next / ongoing step the test set-up has been modified to be able to measure the erosion rate with time. A lid has been introduced to be able to define and control the test conditions at the same time as it becomes possible to measure erosion rate with time.



Based on the coming results it will be possible to build a conceptual model of the erosion phenomena for the Japanese EBS design.

A number of factors may affect the breakthrough pressure:

- test geometry
- buffer materials
- degree of saturation
- Initial density
- homogenisation
- ground water chemistry
- the initial properties of the pellet filling (granule size distribution including the amount and distribution of fines)
- confinement of the system.

This can be investigated in coming work.

If the piping channels are created in the pellet filling instead for in the sand / bentonite mixture of the blocks the sealing of the channel will be more effective. If the piping channel is formed in the blocks there is a risk for sand filled piping channels. Bentonite does not penetrate into the sand very efficiently and the self-healing will probably be incomplete.

To create conceptual and, within time, numerical models to predict how the piping channels are formed and how they self-heal are coming important issues. To do this a number of laboratory and field test will be needed.

#### 2.5.2 Based on status presented at workshop in Kobe, January 2017

SKB comments from the meeting at Äspö in August 2016 have been incorporated in the design in a way that shows that RWMC understands the processes in the test. Exchanging the recommended coarse filter with an open gap is probably an improvement giving an even better ability to measure erosion without a time delay.

The low breakthrough pressure and the fact that no erosion channel through the bentonite could be detected indicate that most of the water was flowing through the bedrock, not through the buffer. Similar laboratory tests where the bedrock is replaced with an impermeable test set up has also given much higher break through pressure and flow resistance. The low flow resistance also indicates that the hydraulic conductivity of the bedrock surrounding the test hole is higher than in other locations in the Horonobe HRL where it has been measured. A recommendation is to measure the conductivity of the rock using a packer that can be move in increments. The results can be used for building a detailed understanding and model of the surrounding bedrock. Using this, the results from the tests can probably be explained.

SKB's experience is that crushed rock / bentonite mixtures are prone to erosion and more importantly don't have as good self sealing properties as pure bentonite. The eroded channel typically is filled with ballast (crushed rock or sand). The bentonite only swell into this ballast channel to a limited degree and a high permeability zone remains after homogenisation. In the latest Horonobe tests it seems like the water flowed through the high permeability rock. The buffer was subjected to very low pressure gradients allowing both case 1 and 2 to swell and resist the forming of piping channels. An important question is if the conductivity of the rock is representative for the rock surrounding a full scale deposition hole in Horonobe. The understanding of the nearfield is, as pointed out by Dr. Asano, very important.

The practical problems with installing the pellets are mainly due to the fine fraction of the pellets sticking to the wet walls of the test hole. The pellets should probably not be optimised for high density but for water handling and for facilitating installation. SKB's experience is that pellets with only one pellet size works best for the buffer.

### 3. Safety functions of the EBS

The overall criterion for evaluating repository safety is the risk criterion issued by the regulator, in Sweden it is stated that "the annual risk of harmful effects after closure does not exceed  $10^{-6}$  for a representative individual in the group exposed to the greatest risk". This is a "top level" criterion that requires input from numerous analyses on lower levels, and where the final risk calculation is the integrated result of various model evaluations using a large set of input data.

A detailed and quantitative understanding and evaluation of repository safety requires a more elaborated description of how the main safety functions of containment and retardation are maintained by the components of the repository. Based on the understanding of the properties of the components and the long-term evolution of the system, a number of subordinate safety functions to containment and retardation can be identified. In this context, a safety function is defined qualitatively as a role through which a repository component contributes to safety. In order to quantitatively evaluate safety, it is desirable to relate or express the safety functions to measurable or calculable quantities, often in the form of barrier conditions.

#### 3.1 Safety functions of the buffer in KBS-3

##### 3.1.1 Limit advective mass transfer

The need to ensure diffusive transport/limit advective mass transfer in the buffer arises firstly from the need to protect the canister from corroding substances in the groundwater (in the case of a copper canister) and secondly from the need to retard radionuclide releases in case the containment of radionuclides in the canister is breached. The transport through the buffer shall therefore be limited and diffusion shall be the dominant transport mechanism. Diffusive transport and limited advective transport in the buffer is achieved by a low hydraulic conductivity and a high enough swelling pressure, that makes the buffer self-sealing if the potential for advective transport should occur. Significant transport of species through the buffer by advection can be neglected compared

to with diffusion if the hydraulic conductivity in the saturated buffer is  $<10^{-12}$  m/s. To ensure diffusive transport, the swelling pressure in the buffer shall be such that it has capability to self-seal conductive features, e.g. remnants from the saturation process such as erosion channels and dead angle locations in the buffer blocks or in the pellet-filled space between the buffer and the rock. Unless such features are sealed, advective transport through or along the buffer may occur. The performance target for swelling pressure is  $>1$  MPa and include a safety margins. In SR-Site, it is concluded that the margin for the hydraulic conductivity is related to the hydraulic gradient and the diffusivity of the substances in question, and that it is significant.

Conditions that can increase the hydraulic conductivity are loss of buffer mass due to mechanical and chemical erosion. Loss of buffer mass will also reduce the self-sealing capacity in cases of the formation of cracks or pipes. Changes in ground water chemistry may also affect these properties. Buffer mass may be lost due to e.g. piping and erosion during the water saturation phase. The contact between buffer and host rock, and between buffer and canister, are not initially tight along the length of the deposition hole due to spaces needed for installation. The pellet-filled gaps do not give so tight a contact that channel formation can be excluded. The swelling of the buffer during saturation is required to be sufficient to self-seal the gaps to prevent preferential flow paths from forming. The potential for, and the related consequences of, mass loss due to interactions of dilute groundwater with bentonite in a fracture intersecting deposition hole are required to be assessed.

### 3.1.2 Limit microbial activity

Microbial activity in the buffer can produce chemical species that may accelerate the corrosion of metals. The most important types of microbes are sulphate-reducing bacteria, which produce sulphide. The prerequisites for significant viability of microbes are sufficient availability of free water, nutrients, and space for living cells to grow. Mechanical forces, low water activity and pore size will therefore affect the microbial activity in the buffer. There is a correlation between dry density/swelling pressure and microbial activity. This correlation has not been sufficiently investigated and it is currently not clear which buffer characteristics limit microbial activity. In the SR-Can safety assessment, the limit for controlling microbial sulphide production was set as a saturated clay density of  $1,800 \text{ kg/m}^3$ .

During the saturation of the buffer, the microbial activity may be enhanced before the swelling pressure is established. Because of the high temperatures, and desiccation effects after deposition of the canister, initial microbial activity close to the canister is not likely. The water content in the buffer will decrease near the canister. The heat from the spent nuclear fuel will introduce a stress on microbial populations. However, many microorganisms can survive and be active at high temperatures, provided that they have access to water, space, electron acceptors, carbon sources and energy that can sustain metabolic processes for repair of unavoidable heat damage in the cells. As a result of a loss of buffer density, sulphide can form due to microbial activity. The pellet-filled gap between the buffer and rock with a lower density, is the buffer volume that may have a more suitable environment for microbial activity.

### 3.1.3 Filter colloids

Colloids, i.e. particles with sizes of the order of  $10^{-9}$  to  $10^{-6}$  m, whose migration is not affected by gravity or inertial forces, can be relatively rapidly transported through the rock. Fuel colloids can form by dissolution of the fuel and due to oversaturation of uranium in the canister interior. Colloids are also formed in the clay-based buffer and backfill materials. These latter colloids can have available sorption sites for radionuclides. If radionuclides can be transported with colloids, the concept of solubility or concentration limits for fuel dissolution is invalid. In addition, colloid-facilitated radionuclide transport can result in faster radionuclide transport in the geosphere. The relatively fast transport of radionuclides with colloids, is a concern in the safety assessment. The transport of fuel colloids from the interior of a damaged canister to the surrounding host rock and deposition tunnel is prevented if the buffer completely envelops the canister and has a density, expressed as dry density, of at least  $1,000 \text{ kg/m}^3$ .

If fuel colloids inside a damaged canister can be transported to the host rock, the concept of solubility or concentration limits for fuel dissolution is invalid. Colloids move mainly by advection in groundwater and by diffusion in pore waters of the host rock, buffer and backfill. These flows are affected by infiltration of less saline waters from the surface during deglaciations. The salinity of the groundwater in the near field of the repository changes during such processes and affects colloid stability.

### 3.1.4 Protect the canister from detrimental mechanical loads – rock shear load

Rock shear movements may occur when stresses in the bedrock are released. Depending on the mechanical properties of the buffer, the rock shear movements may cause the insert to collapse or deform to such extent that the deformation of the copper shell will result in a breach and loss of containment. The less the buffer deforms in the deposition hole the higher the stresses that will be transmitted to the canister, i.e. the higher the shear strength of the buffer, the higher the stresses in the canister. To maintain containment, the shear strength of the buffer must not result in a load larger than the load the canister can withstand for the shear movements expected to occur in a deposition hole.

The buffer shall be designed such that a shear movement in the deposition hole with 5 cm displacement at the rate of 1 m/s, will not cause excessive shear strain on the canister. This implies that the buffer must not be too stiff, and it must not be stiffer than in the canister design analyses). The stiffness of the buffer and its shear strength relates to the swelling pressure, the rate of strain and the dominating cation in the bentonite. The largest shear strength will occur in a fully calcium-exchanged material at the dry density that corresponds to the upper limit for swelling pressure. Experimental results show that the strength increases slightly if the material is exposed to elevated temperatures in a saturated state. This needs need to be considered when determining the technical design requirement related to shear strength.

### 3.1.5 Protect the canister from detrimental mechanical loads – pressure load

The swelling pressure of the buffer needs to be limited so that neither the canister nor the rock is exposed to loads they cannot withstand. High pressures on the canister may result

in breach of the copper shell and loss of containment, and high pressures on the rock may cause cracking that in turn may result in increased transmissivity around the deposition hole. The maximum acceptable buffer swelling pressure in the deposition hole is restricted by the acceptable isostatic load on the canister. A previous performance target (used in SR-Site and TURVA-2012) for the isostatic load on the canister was determined under the assumption that the buffer swelling pressure will not exceed 15 MPa. The now specified performance target (< 10 MPa) is selected based on feed-back from the design analyses of the mechanical loads on the canister and the need of tolerances in design and installation of the buffer.

Groundwater chemistry, salinity and ion-exchange will affect the swelling pressure. This is however already considered in the performance target. The maximum acceptable buffer swelling pressure in the deposition hole is restricted by the acceptable isostatic load on the canister. The installed buffer density shall be chosen so that the swelling pressure of the saturated buffer will not exceed the limit set by the canister. The temperature conditions to which the buffer and the canister are exposed need to be considered in setting the performance targets. After deposition of the canister, the buffer will experience a rise in the temperature. Experimental results show that the swelling pressure decreases slightly if the material is exposed to elevated temperatures in a saturated state.

#### 3.1.6 Resist transformation

The buffer must resist transformation in order to maintain its safety functions in a long-term perspective. At elevated temperatures, chemical alterations of the swelling clay material acting to decrease the development of swelling pressure would occur. The highest temperatures in the repository occur due to the deposition of the spent fuel and the decay power it develops. The buffer must withstand the increase in temperature caused by the decay power developed in the encapsulated spent nuclear fuel. With respect to this, a temperature limit needs to be stated for which it can be demonstrated that the buffer resists transformation and that is acceptable with respect to the encapsulated spent nuclear fuel and the thermal properties of the barrier system. This acceptable temperature is the performance target for the buffer's ability to withstand transformation as well as for favourable thermal conditions in the repository. The alterations of swelling clay materials are also affected by the chemical conditions, and in addition the bedrock shall provide chemically favourable conditions. With respect to the temperature increase resulting from the disposal of the spent nuclear fuel, the buffer shall retain its favourable characteristics at temperatures up to 100°C. This implies that the transformation of its swelling minerals and mechanical properties shall be shown to be insignificant for temperatures up to 100°C. If this performance target is upheld in the buffer, also the backfill and closure containing swelling clay will resist transformation, since their temperatures will be lower than in the buffer.

The advantageous physical characteristics of the buffer, principally its swelling pressure and low hydraulic conductivity, are determined by the capacity for water uptake between the montmorillonite layers (swelling) in the bentonite. Montmorillonite can transform into other minerals) of the same principal atomic structure, but with less or no ability to swell in contact with groundwater. If montmorillonite transformation occurs, the buffer

functions will alter. The transformation processes usually consist of several basic mechanisms. Both thermal and chemical conditions in the repository will impact the montmorillonite transformation processes. Two important transformation processes are illitisation and chloritisation. The illitisation process is limited by a low concentration of potassium. At low concentrations of Fe, chloritisation is insignificant. Also the alkalinity will impact the buffer material. According to several studies, montmorillonite dissolution increases with increasing pH along with increased SiO<sub>2</sub> solubility. Montmorillonite transformation is not likely to occur, or will be limited, unless the temperature in the rock is elevated. Both thermal and chemical conditions that impact the montmorillonite transformation processes have been considered when stating performance targets for favourable conditions in the rock.

### 3.1.7 Keep the canister in position

The buffer's main role is to reduce the potential negative interactions between the canister and the host rock including the groundwater. If the buffer density is too low, it will deform under the weight of the canister and thus allowing the canister either to sink or to tilt so that the surrounding buffer thickness is reduced or the canister even touches the walls or bottom of the deposition hole. If so, the buffer will not surround the canister and the safety function regarding diffusive transport in the buffer would no longer be maintained. Analyses of canister sinking in a deposition hole for a range of buffer densities and hence swelling pressures indicate that the total sinking will be less than 2 cm for swelling pressures of the buffer surrounding the canister down to 0.1 MPa. A performance target > 0.2 MPa is selected based on this information. It can, however, be noted that this target will be automatically satisfied if the swelling pressure required to ensure diffusive transport, which is much higher is upheld.

The buffer needs to be able to support the weight of the canister containing the fuel, which in the Finnish case is 18.8 to 29.0 tons. In the Swedish case, the maximum allowed weight of the canister with spent nuclear fuel is 28 tons. In addition to the swelling pressure, friction between the buffer and the canister and the host rock influence the sinking. The unevenness of the deposition hole may lead to variations in buffer density within the deposition hole, which may then lead to development of a non-uniform swelling pressure that could induce movement of the canister.

### 3.1.8 Retain sufficient mass over life cycle

To maintain the safety functions a certain minimum buffer density is needed. Mass loss would lead to decrease in density and thereby jeopardise these safety functions. The most critical process leading to mass loss over time is chemical erosion. Chemical erosion of the buffer does not occur if the groundwater has sufficient ionic strength. It has been reported that a minimum cation concentration of 4 mM is required to avoid colloid formation. However, recent chemical erosion tests in horizontal and inclined artificial fractures have shown that if the charged cation concentration is 4 mM, at least pure Na<sup>-</sup> and Na/Ca-bentonites are still prone to erosion. However, erosion does not occur at a cation charge concentration of about 8 mM. Also, the pH of the groundwater will impact the chemical erosion, and the tests have been done at near-neutral pH conditions. This has been

considered when stating performance targets for chemically favourable conditions in the rock.

There is a large degree of uncertainty in the detailed salinity distribution around the repository. In addition, the salinities can become sufficiently low for not maintaining the performance target and chemical erosion may occur during some periods, and in some parts of the repository volume. The calculated distributions of salinity obtained from the modelling of the future evolution of the repository site are used in the analysis of buffer evolution.

### 3.1.9 Relation between safety functions and technical design requirements

The design cannot be directly determined from the required safety functions. In a KBS-3 repository the main safety functions of isolation, containment, retention, retardation and protection of other barriers are maintained by barrier specific safety functions assigned to the canister, buffer, backfill, closure and the rock with its underground openings. These barrier specific safety functions specify how each part of the barrier system contributes to the safety of the repository as a whole. The performance targets through which the barrier specific safety functions can be quantitatively evaluated are stated. The potentially occurring conditions, loads and stresses during which the safety functions shall be maintained are compiled and assessed. The safety functions together with the identified conditions and stresses form the basis for the development of a design with characteristics that are potentially capable of maintaining the safety functions in a long-term perspective.

Any design must be robust and possible to be produced in a way that the required characteristics can be achieved with high reliability. Available materials, techniques and possibilities to verify the design and quality assure the produced components of the final repository must also be considered in the development of the repository design. Analyses, trial production and tests performed within the design and development will provide feedback for improvements. The resulting as-built, technically feasible design shall be able to maintain post-closure safety.

### 3.2 Safety functions for horizontal and vertical configurations of KBS-3

The safety functions for KBS-3 described in this chapter are identical for KBS-3H and KBS-3V. This shows that the same safety functions and performance targets can be upheld and met with different technical solutions.

The performance assessment however needs to be adapted to the initial conditions for the given design. This may also mean that different processes may become more or less important. In the vertical design, the expansion of buffer into the backfill is a crucial process, which is rather difficult to evaluate. The equivalent in the horizontal concept is the expansion of the buffer in the horizontal direction, but that process is generally easier to evaluate. On the other hand, the extrusion of bentonite through the super-container in KBS-3H, may have a significant impact on the performance of the entire concept, and may be difficult to evaluate, while the equivalent for that process on the vertical design is the interaction between pellets and blocks in the deposition, which is a simple and straightforward process.

### 3.3 Safety functions and technical design requirements in a Japanese HLW repository

Safety functions are a tool that can be used for the assessment of individual barriers in a nuclear waste repository. As a tool, safety functions are flexible and can be adapted to a particular application. Safety functions are used differently in different national programs.

It is probably a good idea to use some time of safety functions and performance targets for the future buffer material study in METI project. The safety functions can be used to evaluate the performance of a bentonite barrier as a function of the evolution in time. An illustration of the processes that needs to be considered can be found in Figure 3-1. The basis for the safety function should be derived from NUMO's Safety Case (Comprehensive Technical Report 2015). The safety functions can be used to derive technical design requirements for the buffer, but also to derive requirements on countermeasures that may be needed to adapt the repository to a given site.

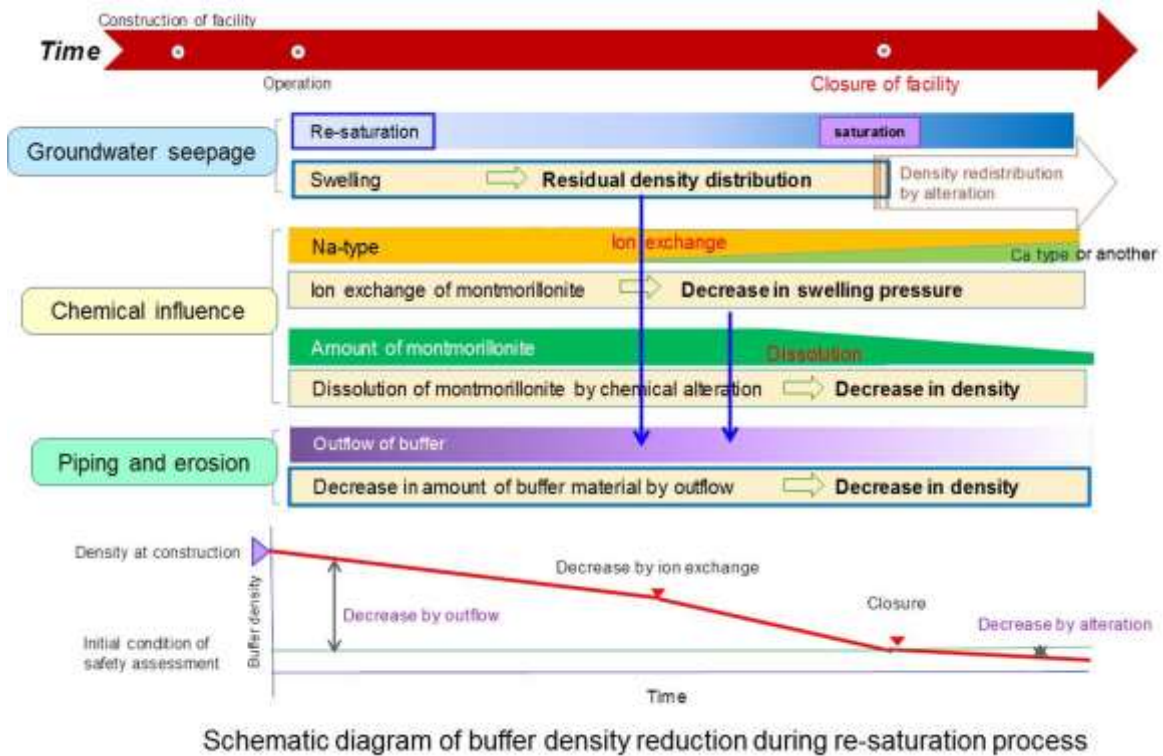


Figure 3-1. Change in buffer material during re-saturation process (from presentation by RWMC 15th meeting on re-saturation of bentonite).

## 4. SKB's experiences on design of EBS

### 4.1 SKB experience

The design of the Engineered Barrier System of the KBS-V has been developed in a number of iterations with analyses of the post closure performance. The iterations are illustrated in Figure 4-1.



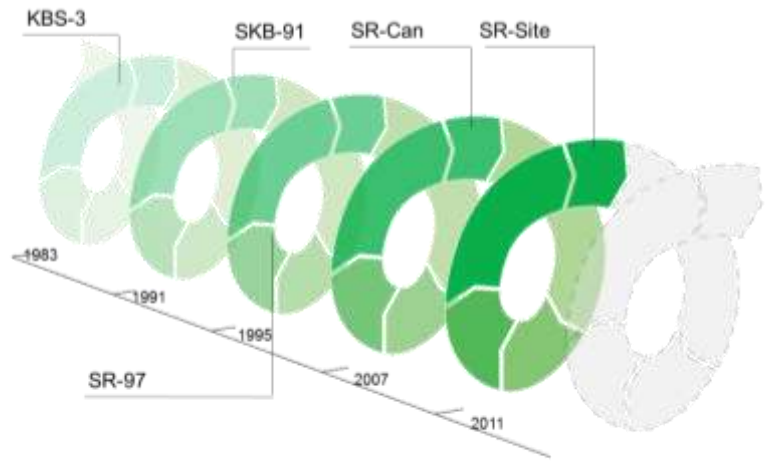


Figure 4-1. Iterative development of post closure safety assessment and EBS design.

Also the site and the repository layout have been included the iterative development of the EBS in the latest iteration for SR-site and the subsequent development work. In Figure 4-2 the design loop for one design step is illustrated.

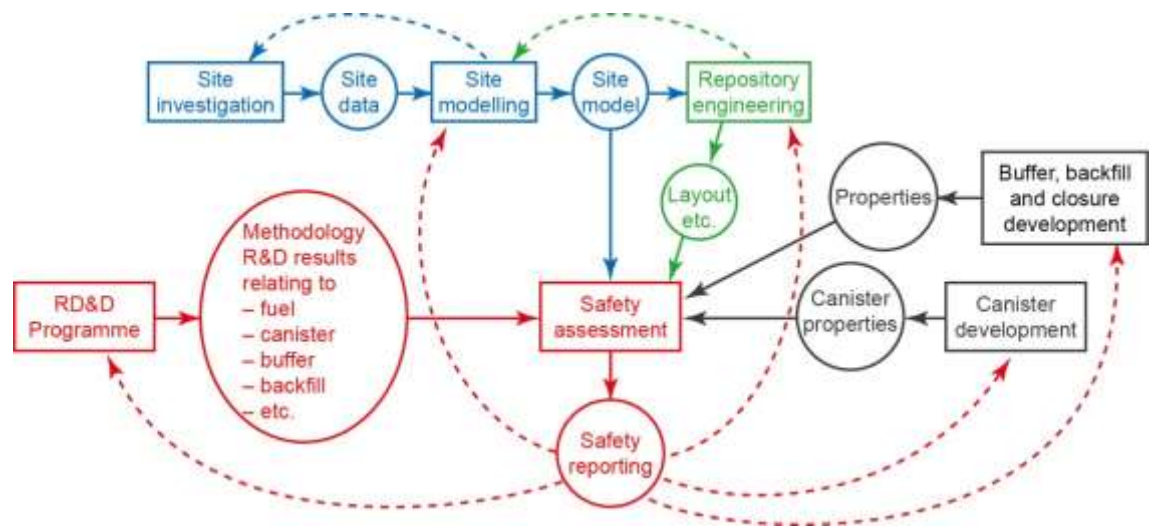


Figure 4-2. The couplings between different parts of the repository system. Note that “Methodology R&D results ...” relate to safety after closure of the repository.

These iteration steps are necessary since the knowledge of the different parts increases with performed work with in the different fields. In order to build a system that all together meets the overarching requirements a stepwise refinement of EBS design has been made. The knowledge on how the different parts of the system interact and the process to achieve an optimised EBS and repository has increased with time. As the

construction of the repository draw closer the aim to optimise the system for cost efficiency increases. In order to do this and still meet requirements from post closure safety a thorough understanding of the different parts of the EBS, the rock and the Repository facility is needed.

As SR-Can was finalised SKB compiled a document with updated requirements for the EBS “Design feedback from SR-can and some subsequent analyses” (SKB 2009). Similar work has been made together with Posiva based on the latest SKB and Posiva post closure safety analyses.

An important tool to show that the EBS can be installed according to the stipulated Technical design bases is the production line reports that were first compiled for the application in 2010 that are now being updated for the PSA (Preliminary safety report) that is needed to get the licence to start construction of the SKB repository facility.

#### 4.2 Recommendations

Since the type of bedrock and the EBS concept has not been decided for the Japanese repository there are many degrees of freedom in the coming EBS and repository design.

It is recommended to perform a first simplified iteration step for the EBS and repository design for the anticipated repository conditions. For rock with high water inflow water handling issues together with piping and erosion may be crucial factors when choosing EBS concept and location for the repository. The knowledge that RWMC has built up during the past years can give a vital contribution to this work.

In general the potential problems related to re-saturation behaviour can be divided into:

1. Practical installation issues
2. Not reaching the stipulated initial state (defined as the intended installed dry density for buffer and backfill)
3. Harmful effects of early THM processes on Buffer and Backfill after installation
4. Other long term safety issues

1) Practical installation issues primarily concerns the backfilling of tunnels. If the inflow is too large the backfill may erode and collapse in a way that makes it difficult or impossible to continue backfilling and deposition sequence. Similar problems could occur for buffer and canister but are more unlikely.

2) Not reaching the stipulated initial state could be the result of THM processes during installation, e.g. swelling of buffer blocks and pellets during installation. For KBS-3V SKB has investigated different methods for protecting buffer and backfill from inflowing water.

3) Harmful effects of early THM processes on Buffer and Backfill after installation. This concern THM processes after installation of barriers, e.g. decreasing density of buffer by upward swelling and redistribution of bentonite by piping and erosion.

There are a number of factors in repository design, barrier design and installation method that affect 1-4 above e.g.:

- a) Water inflow and distribution to deposition holes and tunnels (affected by adaptation to local hydrogeology, drainage grouting etc.
- b) Rock reinforcement (controlling water inflow or not)
- c) Ground water pressure (influenced by repository design)
- d) Length of deposition tunnels
- e) Installation sequence
- f) Installation method for buffer and backfill.

Apart from this there are special measures that can be taken to decrease the negative influence of inflowing water for the installation and early evaluation of the barriers. These factors should be investigated and available options should be described. Based on this, a from this perspective integrated optimal layout / barrier design can be recommended.

A matrix of different EBS design bedrock types and repository layout should be formulated. For these cases pros, cons and risks should be identified. Based on this a recommendation for preferred combinations of EBS concepts and bedrock types can be made. In doing this a number of assumptions have to be made e.g., installation rate, water inflow distribution etc. As a result of going in into detail on the practical issues of EBS installation changes in barrier design may be suggested. Such suggestions need to be evaluated from a long term perspective. Based on this a R&D programme can be formulated.

In order to asses if it is possible to achieve an initial state that conforms with preliminary requirements / specifications for the EBS a recommendation is to start the planning for production and installation of buffer components.

## References

SKB 2009. Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB 2010. Design, production and initial state of the buffer. SKB TR-10-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB 2011. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. SKB TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

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.