

# 処分場を構成する各部位に適用する セメント種類の選定に向けた検討

—各部位の要求特性の抽出と状態変遷の推定に基づく重要度の検討—

(NUMO - 電中研共同研究)

2014年2月  
原子力発電環境整備機構

# 処分場を構成する各部位に適用 するセメント種類の選定に向けた 検討

—各部位の要求特性の抽出と状態変遷の  
推定に基づく重要度の検討—

2014年2月  
原子力発電環境整備機構

2014年 2月 初版発行

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記へお問い合わせください。

〒108-0014 東京都港区芝4丁目1番地23号 三田NNビル2階  
原子力発電環境整備機構 技術部  
電話 03-6371-4004 (技術部) FAX 03-6371-4102

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Science and Technology Department

Nuclear Waste Management Organization of Japan

Mita NN Bldg. 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan

©原子力発電環境整備機構 / 一般財団法人 電力中央研究所

(Nuclear Waste Management Organization of Japan / Central Research Institute of  
Electric Power Industry) 2013

# 処分場を構成する各部位に適用するセメント種類の選定に向けた検討 —各部位の要求特性の抽出と状態変遷の推定に基づく重要度の検討—

藤崎 淳<sup>1)</sup>, 窪田 茂<sup>1)</sup>, 植田 浩義<sup>1)</sup>  
山本 武志<sup>2)</sup>, 杉山 大輔<sup>2)</sup>, 千田 太詩<sup>3)</sup>

## 要旨

精密調査地区選定段階において実施される予定の、処分場の概念設計を効率的に進めるためには、この時点までに、地下施設を構成する各部位に適用する材料を設定し、設計・評価の出発点とするものを準備しておくことが必要である。地下施設を構成する主要な部位にはセメント系材料が適用されることが想定されることから、精密調査地区選定段階への準備として、セメント系材料を適用する部位を整理したうえで、各部位に適用するセメント選定の方法論を構築し、各部位に用いるセメント種類を仮設定しておくことが必要である。

本検討では、地層処分場で適用するセメント系材料選定の方法論の構築に資することを目的として、セメント系材料の適用が想定される部位ごとに、セメント系材料への要求特性を導出・整理した。要求特性の導出にあたっては、各部位の要求機能を満足させるために必要な特性とセメントの変質・劣化による処分システムの安全機能への影響低減のために必要な特性という2つの観点から検討した。さらに、処分坑道周辺の閉鎖後長期におけるセメントの変質・劣化によるシステムの状態変遷の推定を試行した。この試行を通じて、処分システムの安全機能確保において、相対的に重要な部位の特定が可能であることを明らかにした。

---

本検討は、原子力発電環境整備機構と一般財団法人 電力中央研究所との技術協力協定に基づき実施した共同研究の成果に関するものである。

- 1) 原子力発電環境整備機構
- 2) 一般財団法人 電力中央研究所
- 3) 一般財団法人 電力中央研究所 (現 東北大学)



# Investigation of the methodology for selecting cementitious materials for the different components in the underground facility

- Deriving component requirements and investigation of the weighting methodology –

Kiyoshi Fujisaki<sup>\*1</sup>, Shigeru Kubota<sup>\*1</sup>, Hiroyoshi Ueda<sup>\*1</sup>  
Takeshi Yamamoto<sup>\*2</sup>, Daisuke Sugiyama<sup>\*2</sup>, Taiji Chida<sup>\*3</sup>

For conceptual facility design, it is necessary to select appropriate cementitious materials to meet the requirements for each component of the underground disposal facility before detailed investigations are carried out for site selection. Cementitious materials will be used for constructing major components of the underground facility and suitable materials for each component are selected tentatively by comparing the selection methodology with relevant information about the component for which the cementitious material will be used.

The objective of this study is to list and sort the required characteristics of cementitious materials for each component in the facility, in order to provide input for determining the material selection methodology. When deriving the required characteristics of the cementitious materials for each component, physico-chemical properties that will fulfil required operational functions and minimize effects on the safety function of the disposal system due to alteration or degradation were investigated. Based on these investigations, step changes in the state of the disposal system are identified, including the bedrock around the drifts, by considering alteration or degradation of the cementitious material. Significant components for ensuring the safety function can be identified by specifying the step changes in the state of the disposal system.

---

\*1 NUMO

\*2 CRIEPI

\*3 CRIEPI (Present position: Tohoku University)

## 目次

1 はじめに.....	1
1.1 背景と目的.....	1
1.2 本書の構成.....	2
第1章 参考文献.....	3
2 地下施設におけるセメント系材料への要求特性に関する検討.....	4
2.1 検討の流れ.....	4
2.2 地下施設の構成と各部位の要求機能の整理.....	5
2.2.1 セメント適用部位の要求機能と特徴.....	6
2.2.2 ベントナイト系材料が適用される部位の要求機能の整理.....	9
2.2.3 各部位の要求機能のまとめ.....	11
2.3 セメント適用部位自体の要求機能を充足させるための要求特性の導出.....	12
2.3.1 各部位ごとの施工時の要求特性.....	12
2.3.2 各部位に共通の施工時の要求特性.....	13
2.3.3 セメント適用部位自体の要求機能を充足させるための要求特性のまとめ... ..	13
2.4 セメント系材料の変質により変化する特性に関する検討.....	14
2.4.1 セメント系材料の変質がもたらす諸影響要因.....	14
2.4.2 セメント系材料の変質に起因する他材料の特性への影響.....	29
2.4.3 特性変化の低減策の検討.....	37
2.4.4 特性変化低減策実現のためにセメント系材料適用部位に要求される特性... ..	41
2.5 処分システムの安全機能への影響を低減させるための各部位の要求特性の導出.....	43
2.5.1 処分システムの安全機能への影響の抽出.....	43
2.5.2 処分システムの影響を低減させるための各部位の要求特性の整理.....	50

2.6	2章のまとめ .....	59
	第2章 参考文献 .....	62
3	処分システムの状態変遷の推定に基づくセメント系材料の課題抽出 .....	65
3.1	状態変遷の推定の試行 .....	65
3.1.1	検討の前提条件 .....	65
3.1.2	施工手順の設定に基づく長期変質への影響要因の抽出・整理 .....	74
3.1.3	各部位の状態変遷の推定 .....	85
3.1.4	処分システムを対象とした状態変遷の推定 .....	98
3.2	状態変遷の推定に基づく各部位における要求特性の重要度の検討 .....	108
3.2.1	各部位における要求特性の重要度 .....	108
3.2.2	状態変遷の推定における留意点 .....	110
3.3	3章のまとめ .....	110
	第3章 参考文献 .....	111
4	まとめ .....	113

## 図目次

図 2.1-1	要求特性検討の流れ	5
図 2.2-1	処分場の概念図	5
図 2.2-2	処分坑道の構成例（高レベル放射性廃棄物堅置き方式）	6
図 2.2-3	強度プラグの形状の例	8
図 2.2-4	ロックボルトの概要	9
図 2.2-5	止水プラグの概念	10
図 2.4-1	OPC 硬化体から溶出する各種成分の挙動	16
図 2.4-2	POSIVA の ONKALO サイトでのグラウト材添加有機化合物の溶出性評価試験の概念図	17
図 2.4-3	グラウト材に添加したナフタレンスルホン酸系高性能減水剤に含まれる有機化合物の分子量分析結果	18
図 2.4-4	グラウト材に添加したメラミンサルフォネート系高性能減水剤に含まれる有機化合物の分子量分析結果	18
図 2.4-5	グラウト材の近傍およびグラウト材の無い母岩における地下水中の有機成分分子量の分析結果	19
図 2.4-6	降水系模擬地下水に浸漬した薄板状普通セメント硬化体の構成相の変化	21
図 2.4-7	降水系模擬地下水に浸漬した薄板状普通セメント硬化体の細孔径分布の変化	21
図 2.4-8	海水系模擬地下水に浸漬した薄板状普通セメント硬化体の構成相の変化	22
図 2.4-9	海水系模擬地下水に浸漬した薄板状普通セメント硬化体の細孔径分布の変化	22
図 2.4-10	1910 年に打設されたストックホルム貯水槽コンクリート吹付けモルタルの溶脱変質部における化学組成比	24
図 2.4-11	ストックホルムの貯水槽コンクリート吹付けモルタル（試料名：1927 年-2）の溶脱変質部の偏光顕微鏡写真	24
図 2.4-12	イオン交換水中（液交換有り）での OPC ペースト硬化体の溶脱変質フロント進行量の比較	25
図 2.4-13	OPC とフライアッシュ混和セメントペーストの溶脱変質に伴う Ca/Si 比の変化と空隙形成状態の比較	26
図 2.4-14	セメント硬化体における溶脱変質フロントの進行モデル図	27

図 2.4-15	空隙率と透水係数の関係.....	28
図 2.4-16	合成エーライト, 早強セメント使用モルタルの全細孔容積率と圧縮強度 の関係.....	28
図 2.4-17	セメント硬化体のひび割れ幅と透水係数の関係の例.....	29
図 2.4-18	セメント系材料の溶脱に伴う空隙の増加による影響事象の概念.....	30
図 2.4-19	実験的研究および天然事例に基づく鉱物(スメクタイト, ベントナイト) のアルカリ変質過程の概念図.....	31
図 2.4-20	Ca(OH) <sub>2</sub> 溶液が圧密ベントナイト試料に接触する過程でモンモリロナイト 近傍に生じた C-S-H.....	32
図 2.4-21	Ca(OH) <sub>2</sub> 溶液が圧密ベントナイト試料に接触する過程で生じる C-S-H 沈 殿の概念図.....	33
図 2.4-22	<b>泥岩層にセメントペーストを注入後 15 年間経過した接触試料の採取方 法.....</b>	<b>34</b>
図 2.4-23	セメント・泥岩界面近傍の放射線写真法分析用試料.....	35
図 2.4-24	セメント・泥岩界面近傍における粒子密度分布.....	35
図 2.4-25	セメント・泥岩界面近傍における全空隙率分布(実態顕微鏡観察による 評価).....	36
図 2.4-26	セメントと母岩界面近傍における空隙量分布図(放射線写真法による評 価).....	36
図 2.4-27	ひび割れの発生により生起する事象のイメージ.....	37
図 2.4-28	セメント系材料の変質により生起する事象の因果関係.....	37
図 2.4-29	ひび割れの発生を起因とする関連事象.....	38
図 2.4-30	セメントの溶脱に伴う空隙の増加を起因とする関連事象.....	39
図 2.4-31	セメントの溶脱に伴う高アルカリ成分の溶出を起因とする関連事象.....	40
図 3.1-1	処分坑道断面.....	68
図 3.1-2	坑道離間距離および廃棄体ピッチ.....	69
図 3.1-3	止水プラグと強度プラグの位置関係.....	69
図 3.1-4	止水プラグの形状・寸法.....	70
図 3.1-5	強度プラグの形状・寸法(埋め戻し材側).....	70
図 3.1-6	強度プラグの形状・寸法(連絡坑道側).....	71

図 3.1-7	グラウチングによる改良範囲の概念図.....	71
図 3.1-8	人工バリアの仕様.....	72
図 3.1-9	処分坑道における一連のプロセスの施工順序.....	74
図 3.1-10	今回の検討において設定した坑道構築のフロー.....	75
図 3.1-11	ロータリー掘削機の概要.....	76
図 3.1-12	廃棄体定置手順（処分孔竖置き，緩衝材ブロック定置）.....	77
図 3.1-13	埋め戻し工法概念図.....	78
図 3.1-14	施工時におけるバリア性能への影響要因と対策（グラウチングから上半掘削）.....	79
図 3.1-15	施工時におけるバリア性能への影響要因と対策（インバートコンクリートから床版コンクリート）.....	80
図 3.1-16	施工時におけるバリア性能への影響要因と対策（処分孔掘削から廃棄体定置）.....	81
図 3.1-17	施工時におけるバリア性能への影響要因と対策（埋め戻しから強度プラグ）.....	82
図 3.1-18	施工時におけるバリア性能への影響要因と対策（止水プラグ）.....	83
図 3.1-19	施工時におけるバリア性能への影響要因と対策（連絡坑道側強度プラグ）.....	84
図 3.1-20	Ca/Si 比の異なる C-S-H 相の溶脱変質状態.....	85
図 3.1-21	コンクリート地下施設の溶脱変質状態の解析結果.....	86
図 3.1-22	Marty et al. (2009) が解析対象としている施設の断面構成.....	87
図 3.1-23	粘土層への支保コンクリートのアルカリ影響の解析結果.....	87
図 3.1-24	コンクリートと母岩の間に生じる相互作用に伴う pH 変化の解析結果....	88
図 3.1-25	Wang et al. (2007) が解析対象としている施設の断面構成.....	88
図 3.1-26	アルカリブルームの状態および泥岩層内のアルカリ変質範囲の解析結果.....	89
図 3.1-27	支保コンクリートのアルカリ影響に伴う泥岩層の鉱物組成変化の解析結果.....	90
図 3.1-28	泥岩層に吹付けたコンクリートの界面近傍における鉱物相構成量変化の解析結果.....	91

図 3.1-29	花崗岩中の亀裂にセメント由来のアルカリ成分を流し続けた場合の二次鉍物析出状態の解析結果 (1,000 年後)	92
図 3.1-30	支保工コンクリート, 緩衝材, 廃棄体層+構造躯体間で生じる変質解析の 1 次元解析モデル	94
図 3.1-31	pH 分布の経時変化	95
図 3.1-32	間隙割合分布の経時変化	95
図 3.1-33	解析モデル内の鉍物分布解析結果 (10 <sup>5</sup> 年後)	96
図 3.1-34	ベントナイト層のアルカリ変質に係る通水量の感度解析結果	97
図 3.1-35	状態変遷図	102
図 3.1-36	降水系地下水条件における結晶質岩のアルカリ変質挙動解析結果 (10,000 年)	105
図 3.1-37	降水系地下水条件における結晶質岩中の高 pH プルームの拡大過程解析結果	105
図 3.1-38	海水系地下水条件における結晶質岩のアルカリ変質挙動解析結果 (10,000 年)	106
図 3.1-39	海水系地下水条件における結晶岩中の高 pH プルームの拡大過程解析結果	107
図 3.1-40	クニゲル V1 の降水系/海水系地下水を通水した場合の有効粘土密度と透水係数の関係	107

## 表目次

表 2.2-1	処分坑道を構成する各部位の要求機能と特徴	11
表 2.3-1	セメント適用部位自体の要求機能を充足させるための要求特性	14
表 2.4-1	降水系模擬地下水（ALL-MR）および海水系模擬地下水（OL-SR）の溶液組成 (mg/dm <sup>3</sup> )	20
表 2.4-2	ストックホルム郊外 Norsborg の貯水槽コンクリートが接触する水質	23
表 2.4-3	ひび割れの発生を起因とする特性変化低減策	38
表 2.4-4	セメントの溶脱に伴う空隙の増加を起因とする事象についての対策	39
表 2.4-5	セメントの溶脱に伴う高アルカリ成分の溶出を起因とする事象についての対策	40
表 2.4-6	特性変化低減策を実現する為の要求特性	43
表 2.5-1	影響事象の整理結果（支保コンクリート）	44
表 2.5-2	影響事象の整理結果（インバートコンクリート）	45
表 2.5-3	影響事象の整理結果（床版コンクリート）	46
表 2.5-4	影響事象の整理結果（強度プラグ）	47
表 2.5-5	影響事象の整理結果（グラウト）	48
表 2.5-6	影響事象の整理結果（ロックボルト定着材）	49
表 2.5-7	各部位の要求特性の整理結果（支保コンクリート）	51
表 2.5-8	各部位の要求特性の整理結果（支保コンクリート）	52
表 2.5-9	各部位の要求特性の整理結果（インバートコンクリート）	53
表 2.5-10	各部位の要求特性の整理結果（インバートコンクリート）	54
表 2.5-11	各部位の要求特性の整理結果（床版コンクリート）	55
表 2.5-12	各部位の要求特性の整理結果（床版コンクリート）	56
表 2.5-13	各部位の要求特性の整理結果（強度プラグ）	57
表 2.5-14	各部位の設計要件の整理（グラウト）	58
表 2.5-15	各部位の要求特性の整理結果（ロックボルト定着材）	58
表 2.5-16	処分システムへの影響を低減させるための要求特性	59
表 2.6-1	セメント適用部位の要求機能と要求特性のまとめ	61
表 3.1-1	状態変遷の試行に用いたパラメータ	66



表 3.1-2	各部材の条件設定 .....	67
表 3.1-3	単位表面積あたりのセメント使用量.....	73
表 3.1-4	緩衝材が受けるアルカリ変質解析における変数設定 .....	94
表 3.1-5	第2次 TRU レポートの解析に使用する地下水組成 .....	104
表 3.1-6	降水系／海水系地下水の違いに応じた緩衝材の仕様例 .....	108

# 1 はじめに

## 1.1 背景と目的

高レベル放射性廃棄物地層処分施設では、建設ならびに作業時の安全確保のために止水グラウト、コンクリート支保など通常のトンネルに用いられる部位に加えて、強度プラグなど比較的多くの部位にセメント系材料が利用されると考えられる。一方、放射性廃棄物地層処分施設には、核種移行抑制機能も要求されるため、セメント系材料には建設・作業時の力学的な安定性の確保だけではなく、閉鎖後長年にわたり緩衝材、止水プラグなどのベントナイト系材料ならびに天然バリアとしての母岩の移行抑制機能に対する影響が少ないことが求められている（原子力発電環境整備機構，2011）。

一般構造物に使用されているセメントは、普通ポルトランドセメント（以下、OPC という）、早強ポルトランドセメントなどのポルトランドセメント、もしくはOPCに高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどの混和材を混合したセメントであり（セメント協会，2009）、硬化体中間隙水のpHは約12.5～13程度の高アルカリ性を示す（丸屋・松岡，1993）。このようなセメント系材料を処分場地下施設で使用した場合に、地下水に高アルカリ成分が溶出し、近接するベントナイト系材料および母岩にアルカリ変質がもたらされることが指摘されている（Gaucher et al., 2006）（Gaboreau et al., 2011）。このアルカリ変質のメカニズムに関する研究は現在多くの機関で進められているが、処分システムが確保すべき安全機能、特に「閉鎖後閉じ込め」の基本概念に対する「放射性物質の浸出抑制」と「放射性物質の移行抑制」に係る安全機能に対するセメントのアルカリ影響の大きさに着目した検討は十分には行われていない。一方、ケイ素質に富む材料をポルトランドセメントに混合使用することで低アルカリ性を確保するなどした各種の低アルカリ性セメントは、地下施設において周辺にもたらすアルカリ影響を軽減でき、長期安全性を評価する上でも施設全体系における核種移行抑制機能に与える不確実性を低減できると考えられている（原子力発電環境整備機構，2004）。

上述のように、処分施設に用いることが想定されるセメント系材料に関する技術開発が進められているが、我が国では、精密調査地区選定段階において検討対象となる地質環境条件下で想定される建設・作業時の実現性の確保と併せて処分システムの安全機能の確保の見通しが得られるセメント系材料を選定できることが望まれる。

このような背景のもと、本検討では、セメント系材料の適用が想定される処分場の各部位（以下、「セメント適用部位」という）に求められる特性（以下、「要求特性」という）を導出・整理した上で、処分坑道周辺を対象とした処分システムの状態変遷の推定を試みる。これら一連の検討を通じて、全体系の中での各部位の状態変遷の過程を把握し、セメント系材料に関して今後優先的に取り組むべき検討事項を明らかにする。

## 1.2 本書の構成

2章では、地下施設を構成する各部位の要求機能を整理したうえで、セメント適用部位の要求特性を次の2つの観点から整理する。

- ①セメント系材料が適用される部位の要求機能を充足させるために必要な特性
- ②セメントの変質・劣化に起因する処分システムの安全機能への影響を低減するために必要な特性

3章では、セメント系材料の変質に起因する処分システムの状態の変遷を検討する。図に表したシステムの状態変遷から、処分システムの安全機能確保の上で、重要となるセメント適用部位を特定する。また、セメント系材料に関して今後優先的に取り組むべき検討事項について考察する。

4章では、一連の検討成果を取りまとめる。

## 第1章 参考文献

Gaboreau, S., et al.(2011) : 15 years of in situ cement-argillite interaction from Tournemire URL - Characterisation of the multi-scale spatial heterogeneities of pore space evolution, Applied Geochemistry, Vol.26, pp.2159-2171.

Gaucher, E.C., et al. (2006) : Cement/Clay interactions – A review : Experiments, natural analogues, and modeling, Waste management, Vol.26, pp.776-788.

原子力発電環境整備機構 (2004) : Proceedings of the international workshop on bentonite-cement interaction in repository environments, NUMO-TR-04-05.

原子力発電環境整備機構(2011) : 地層処分事業の安全確保(2010年度版), NUMO-TR-11-01.

丸屋 剛, 松岡 康訓 (1993) : 液相および固相の分析による結合材の耐久性評価に関する研究, 土木学会論文集, No.478/V-21, pp.41-50.

セメント協会 (2009) : セメントの常識.

## 2 地下施設におけるセメント系材料への要求特性に関する検討

本章では、高レベル放射性廃棄物処分場を対象として、セメント適用部位の要求特性を設定し整理する。

### 2.1 検討の流れ

ここでは、地下施設に適用されることが想定されるセメント系材料に対する要求特性を導出する流れを概説する。

処分場に適用されるセメント系材料には、以下の2つの観点からの材料特性を満足することが要求される。

- ① セメント適用部位自体の安全機能や工学的成立性確保の観点から要求される機能（以下、「要求機能」という）を充足させるための特性
- ② 処分システムの安全機能への影響を低減させるための特性

①については、セメント適用部位の要求機能を整理し、それを充足させるために必要な特性として導出される。②については、セメント系材料の変質により生じる処分システムの安全機能への影響を整理し、その影響を低減するために必要な特性として導出される。ここでの処分システムの安全機能への影響の整理は、以下の流れで実施する。

- (i) セメント適用部位ごとに、その部位およびそれ以外の部位（人工バリアなど）において、セメント系材料の変質に起因して、それぞれの特性が変化する事象を抽出する。
- (ii) 対象部位の特徴を加味し、それに起因して生じる問題がある場合は、それを抽出・整理する。
- (iii) 処分システムを構成する各部位の要求機能を考慮して、処分システムの安全機能への影響を整理する。

図 2.1-1 に上記検討の流れを示す。ここで、図中に記した数字は、以降の節の番号を指す。

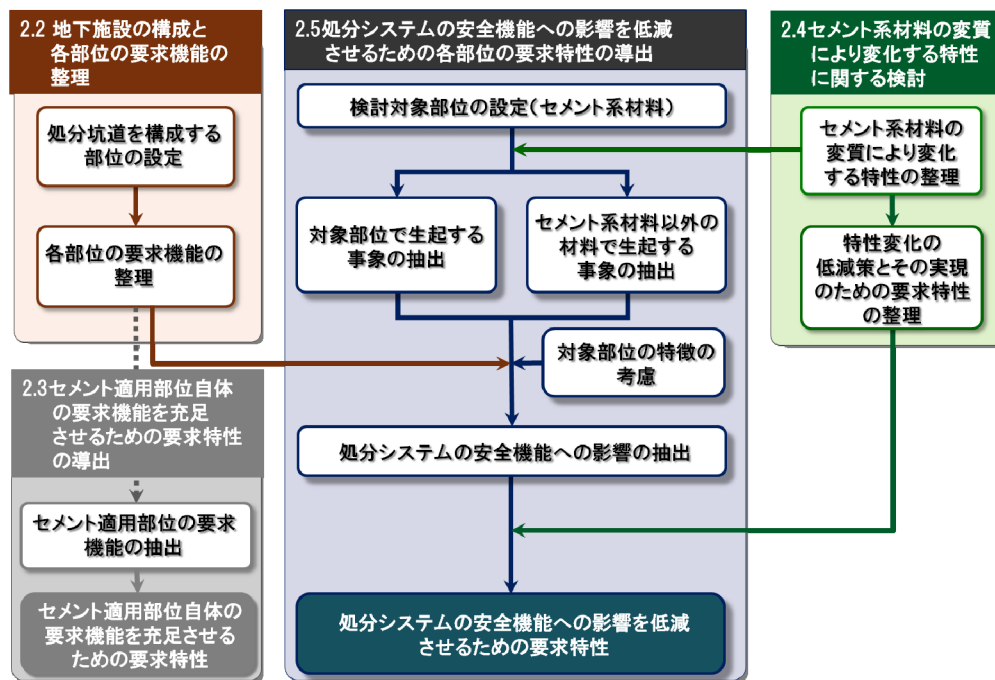


図 2.1-1 要求特性検討の流れ

## 2.2 地下施設の構成と各部位の要求機能の整理

高レベル放射性廃棄物処分場の地下施設は図 2.2-1 に示すように、アクセス坑道（立坑、斜坑）、処分パネル（処分坑道群と主要坑道）および連絡坑道などから構成される。

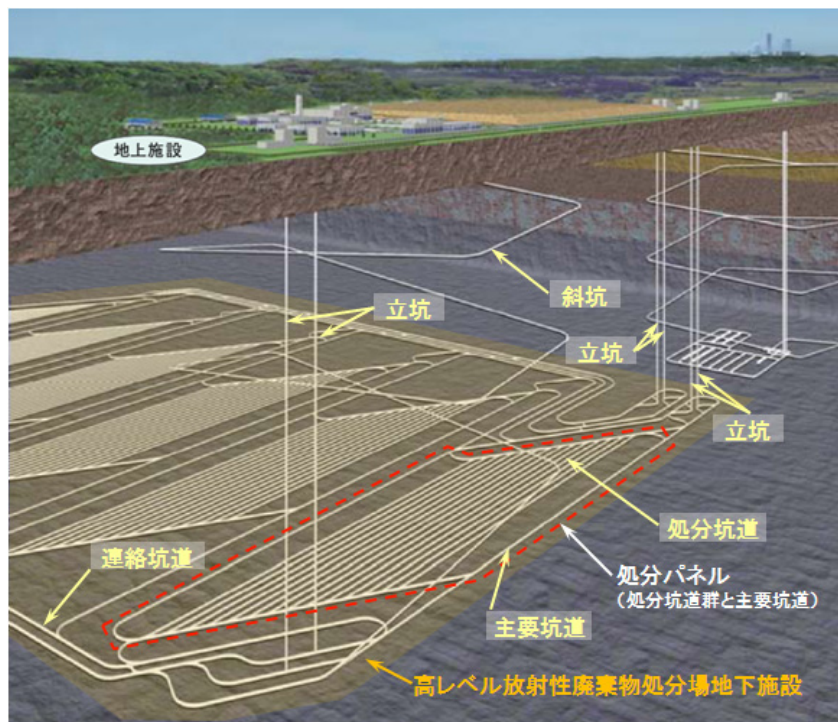


図 2.2-1 処分場の概念図（原環機構, 2009 に加筆・修正）

アクセス坑道（立坑および斜坑）は地上施設と地下の連絡坑道を結ぶものであり，廃棄体や建設資材の搬入，掘削土の搬出，換気，電力などの供給といった様々な役割を持つ。処分パネルは，廃棄体が定置される処分坑道群とその周囲に配置される主要坑道を指す。また，連絡坑道はこれらの処分パネルを結ぶ坑道である。主要坑道および連絡坑道はアクセス坑道と同様の役割を持つ。

上記の各坑道においてセメント系材料の適用が想定されるが，本章における検討においては，閉鎖後長期の安全性確保を考慮に入れてセメント系材料の要求特性を検討するため，緩衝材などの主要な人工バリアが定置される処分坑道を検討の対象とした。図 2.2-2 に高レベル放射性廃棄物処分の廃棄体堅置き方式の処分坑道の構成の例を示す。ここで，セメント系材料の適用が想定されるのは，支保コンクリート，インバートコンクリート，床版コンクリート，強度プラグ，グラウト，ロックボルト定着材である。また，ベントナイト系材料の適用が想定されるのは，緩衝材，止水プラグ，埋め戻し材である。

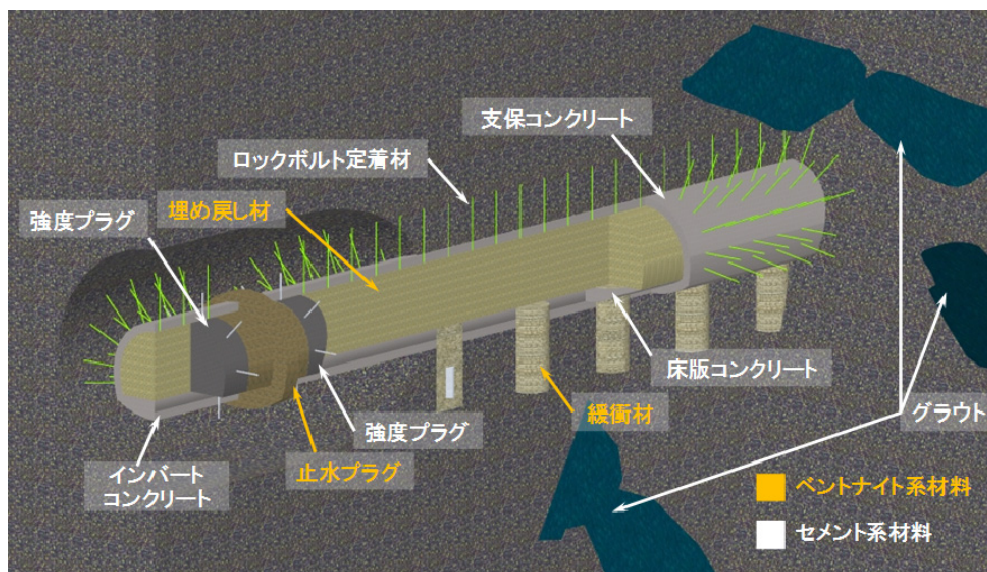


図 2.2-2 処分坑道の構成例（高レベル放射性廃棄物堅置き方式）

### 2.2.1 セメント適用部位の要求機能と特徴

ここでは，セメント適用部位について，それらの要求機能と特徴を整理する。セメント系材料には長期安全性の観点からのバリア機能を付与しないものとし，工学的実現性の確保という観点（原子力発電環境整備機構，2011）から要求機能を設定する。

### (1) 支保コンクリート

支保コンクリートの要求機能は、建設、操業および閉鎖の作業を安全に実施できるよう、空洞の安定性を確保することであり、構造の特徴として坑道に沿った連続する構造を有する。岩盤強度が地圧に対して十分高く、理論上は支保コンクリートを設置せずとも空洞の安定性が確保される場合にも、建設・操業中の岩片の剥離・落下による災害を防止するという観点から、必要最低限の厚さの支保コンクリートが設置されることが想定される。

### (2) インバートコンクリート

インバートコンクリートの要求機能は、支保コンクリートと同様に、建設、操業および閉鎖の作業を安全に実施できるよう、空洞の安定性を確保することであり、構造の特徴として、坑道に沿って連続する構造を有する。

### (3) 床版コンクリート

床版コンクリートの要求機能は、操業および閉鎖の工程において使用される機器などの走行を可能とすることであり、構造の特徴として坑道に沿って連続する構造を有する。

### (4) 強度プラグ

強度プラグの要求機能は、処分坑道を埋め戻し処分場を閉鎖するまでの期間、埋め戻し材の膨出と止水プラグの変形を防止することである。このため、構造の設計においては、埋め戻し材および止水プラグの膨潤圧を外力として考慮し、これに対して必要な強度が確保されるように実施する。海外の検討事例として、SKBではコンクリート製のプラグの検討が進められており（SKB, 2010）、ここでは、部材厚さが1.7 m以上となるような構造となっている（図 2.2-3）。このように、強度プラグの特徴は、セメントを多量に使用する部位であり、また、部材厚さから考えるとマスコンクリートとして取り扱う必要性があることが挙げられる。そのため、コンクリート打設時の発熱影響などに対して留意すべきである。



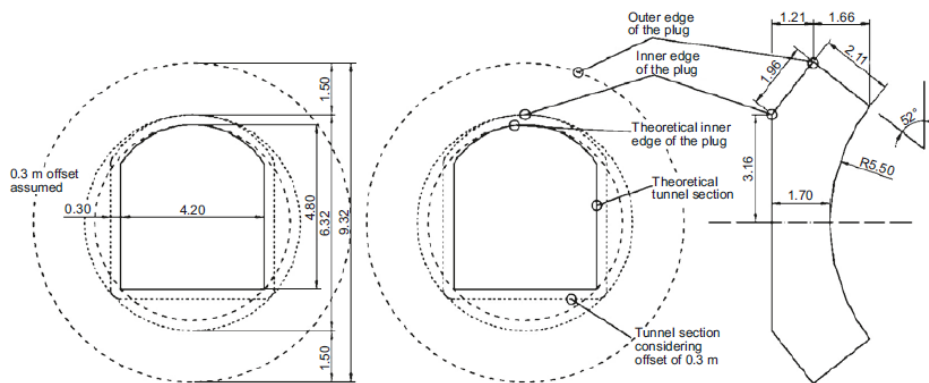


図 2.2-3 強度プラグの形状の例 (SKB, 2010)

### (5) グラウト

坑道への湧水が多量である場合、掘削における作業環境の悪化および切羽の自立性の低下により、掘進の成立性の確保が困難になることが想定される。さらに、掘削完了後においては、坑道への地下水の流入に伴い、処分場周辺の地下水流動場に影響を与え、地下水の地球化学場に擾乱を与えること、および作業時の緩衝材定置を困難にすることが懸念される (POSIVA, 2009)。グラウティングには、これらの坑道への湧水に起因する、工学的成立性および長期安全性の確保に対する悪影響を回避または低減するために湧水を抑制する機能が期待される。なお、グラウトは、岩盤に注入する材料を指し、グラウトを岩盤に注入する行為はグラウティングという。

グラウティングにおいては、単位時間あたりの注入量が管理値に低下するまで、もしくは注入圧力が管理値を上回るまで注入を継続することが一般的であり ((財) 国土開発技術センター, 2002)、この場合、グラウトの注入量は施工前には不確定である。さらに、注入されたグラウトは卓越する亀裂分布方向に浸透することが既往の研究で示されており (寺戸ほか, 1998)、これらのことから、グラウトを設計の浸透範囲を制御して、注入対象範囲内に一様に充填することは困難であると考えられる。また、グラウトは亀裂への浸透・充填の過程で脱水され、注入前よりも水セメント比が低下することが既往の研究で示されており (内田ほか, 2006)、このことから、グラウティングの特徴として、充填された硬化体の品質保証が困難であることが挙げられる。

### (6) ロックボルト定着材

ロックボルトはトンネル壁面から地山内部に穿孔された孔のほぼ中央に定置された鋼棒などの芯材、芯材を孔の周囲の地山と一体化するための定着材および頭部で芯材と吹付けコンクリートなどを一体化するためのプレートとナットから構成される複合材料である (土木学会, 2006)。図 2.2-4 にロックボルトの概要を示す。

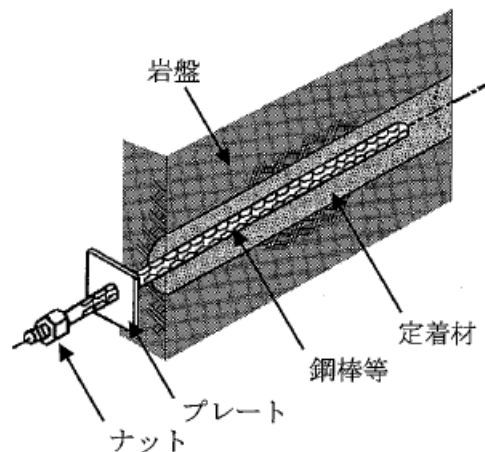


図 2.2-4 ロックボルトの概要（土木学会，2006）

ロックボルト定着材の要求機能は、鋼棒を岩盤に速やかに定着させることであり、材料としては、工場で早強セメント、増粘剤などの添加剤、細砂を混合して生産された、品質のばらつきの少ないプレミックスタイプの早強モルタルが多く使用されている（土木学会，2006）。鋼棒の径としては、施工性の観点から径 21 mm から 25 mm のものが一般的であり、また、鋼材を挿入するための孔の径は、40 mm から 70 mm 程度であることから、単位長さ当たりに充填されるセメント系材料は少量であることが想定される。なお、ロックボルトはシステムボルトとして、坑道延長方向に概ね 1.0 m から 1.5 m 間隔で設置されるのが一般的である。

## 2.2.2 ベントナイト系材料が適用される部位の要求機能の整理

既往の検討（原子力発電環境整備機構，2011）において、ベントナイト系材料の適用が想定される、緩衝材、止水プラグおよび埋め戻し材には、「放射性物質の移行抑制」という観点からの安全機能が期待されている。ここでは、ベントナイト系材料に対する要求機能として、これらの安全機能を整理する。

### (1) 緩衝材

緩衝材に求められる具体的な安全機能としては、「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」が挙げられる（原子力発電環境整備機構，2011）。

### (2) 止水プラグ

止水プラグは坑道の端部に設置され、止水プラグに求められる具体的な安全機能として

は、「坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制」である（原子力発電環境整備機構，2011）。図 2.2-5 に第 2 次 TRU レポート（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）で示された水理プラグ（止水プラグ）の概念を示す。止水プラグの材料としては，ベントナイト混合土が想定される。

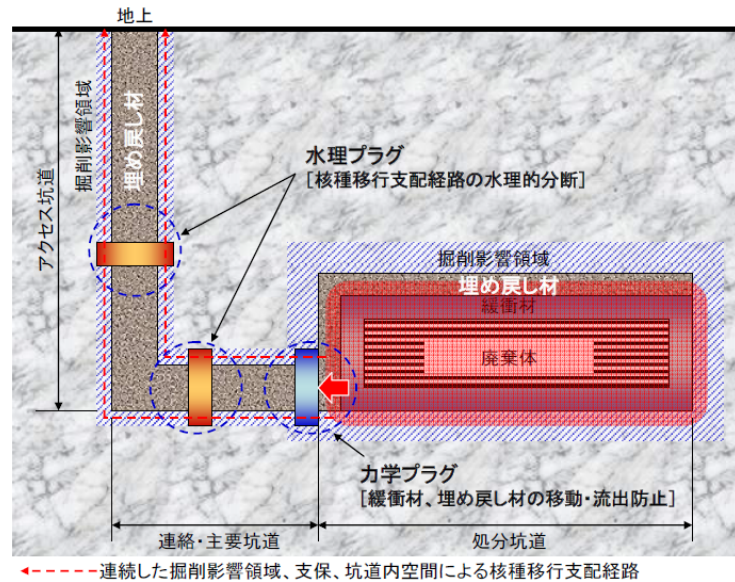


図 2.2-5 止水プラグの概念（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）  
（図中の水理プラグが止水プラグに相当）

### (3) 埋め戻し材

埋め戻し材は，坑道内部の空間を埋める材料であり，要求される具体的な安全機能は止水プラグと同様に，「坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制」である（原子力発電環境整備機構，2011）。埋め戻しに適用される材料としては，ベントナイトを主として，掘削土などの材料を混合したものが想定される。

### 2.2.3 各部位の要求機能のまとめ

2.2.1 および 2.2.2 で示した処分坑道を構成する各部位の要求機能とそれぞれの部位の特徴を表 2.2-1 にまとめる。

表 2.2-1 処分坑道を構成する各部位の要求機能と特徴

部位	工学的実現性の確保の観点からの要求機能	長期安全性の観点からの要求機能	部位の特徴など
支保 コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> <li>空洞安定性の確保</li> </ul>	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑道に沿って連続した構造となる</li> </ul>
インバート コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> <li>空洞安定性の確保</li> </ul>	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑道に沿って連続した構造となる</li> </ul>
床版 コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> <li>操業および閉鎖の作業性の確保</li> </ul>	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑道に沿って連続した構造となる</li> </ul>
強度プラグ	<ul style="list-style-type: none"> <li>埋戻し材の膨出防止</li> <li>止水プラグの変形防止</li> </ul>	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>マスコンクリートとなる</li> </ul>
グラウト	<ul style="list-style-type: none"> <li>湧水の抑制</li> </ul>	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>注入範囲の制御が困難</li> <li>充填されたグラウトの品質保証が困難</li> </ul>
ロックボルト 定着材	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼棒の岩盤への速やかな定着</li> </ul>	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑道に沿って一定間隔で設置される</li> <li>単位長さ当たりの使用量が小さい</li> </ul>
緩衝材	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>移流による移行の抑制</li> <li>コロイド移行の防止・抑制</li> <li>収着による放射性物質の移行遅延</li> </ul>	—
止水プラグ	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制</li> </ul>	—
埋戻し材	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑道に沿って連続した構造となる</li> </ul>

## 2.3 セメント適用部位自体の要求機能を充足させるための要求特性の導出

2.2.3 で整理したセメント適用部位の要求機能を満足する為には、いずれの部位についても外力に対する安定性を確保することが必要であるから、共通の要求特性として、「所定の強度特性（例えば、圧縮強度や強度の発現性）」が挙げられる。ただし、これはセメント系材料の硬化後における要求特性であることから、硬化前、すなわち施工時において「所定の強度特性」を確保する為の前提となる条件を整理し、それに応じた要求特性（以下、「施工時の要求特性」という）を設定する。

### 2.3.1 各部位ごとの施工時の要求特性

ここでは、各部位ごとに設定した一般的な地下空洞施工において実績の多い施工法の特徴を考慮し、「所定の強度特性」を確保する為に必要となる要求特性を抽出・整理する。

#### (1) 支保コンクリートおよびインバートコンクリート

本検討では、支保コンクリートおよびインバートコンクリートは、吹き付け工法で施工することとする。この場合、空洞の力学的安定性を確保するためには、吹付けたコンクリートが速やかに「所定の強度特性」を発現することが必要である。速やかな「所定の強度特性」の発現は、硬化前のコンクリートに添加される急結剤（混和剤）がセメントと効果的に反応することで実現されるものである。このため、施工時における吹付けコンクリートへの要求特性として「混和剤との適合性」を設定した。

#### (2) 強度プラグ

本検討において、強度プラグは無筋コンクリートとして、レディーミクストコンクリートを現場打ちで施工することとする。現場打ちのコンクリートの場合、「所定の強度特性」を得るためには、コンクリートが硬化前に型枠内に空隙なく充填されることが必要である。このことから、硬化前の強度プラグコンクリートへの要求特性として、「充填可能な流動性」を設定した。さらに、「充填可能な流動性」を確保する為には、高性能 AE 減水剤などの混和剤を用いることが想定されるため、この場合、用いる混和剤との適合性が問題となることから、「混和剤との適合性」を要求特性として設定した。

#### (3) グラウト

グラウトがその機能を発揮するためには、水みちとなる亀裂に充填されることが必要である。このことから、硬化前のグラウトへの要求特性として、「対象亀裂への浸透性」を設定した。さらに、「対象亀裂への浸透性」を確保する為には、高性能 AE 減水剤などの混和

剤を用いることが想定されるため、この場合、用いる混和剤との適合性が問題となることから、「混和剤との適合性」を要求特性として設定した。

#### (4) 床版コンクリート

本検討において床版コンクリートは、現場打ちで施工することとする。この場合、要求特性は強度プラグと同様に「充填可能な流動性」を設定した。また、(3)の強度プラグに関する記述と同様に、「充填可能な流動性」を確保する為に必要な特性として、「混和剤との適合性」を設定した。

#### (5) ロックボルト定着材

本検討ではロックボルトは、現場で練混ぜたモルタルを注入する方法で施工することとする。ロックボルトは支保部材であるため、打設後、速やかにその機能を発揮することが要求される。したがって、鋼棒を岩盤に定着させるロックボルト定着材は、設置後、速やかに「所定の強度特性」を発現することが必要である。この速やかな「所定の強度特性」の発現は、硬化前のコンクリートに添加される増粘剤などの混和剤がセメントと効果的に反応することで実現されるものであるから、施工時におけるロックボルト定着材への要求特性として「混和剤との適合性」を設定した。

### 2.3.2 各部位に共通の施工時の要求特性

各部位に共通の前提条件としては、「施工の成立性の確保」が挙げられる。本検討では、いずれの部位においても、現場で練混ぜたセメント系材料を配管で輸送する工程が想定されるので、施工の成立性を確保する為に「圧送が可能であること」が前提条件として必要となる。圧送を可能とするために要求される特性として流動性が挙げられることから、各部位に共通の要求特性として「圧送可能な流動性」が挙げられる。

### 2.3.3 セメント適用部位自体の要求機能を充足させるための要求特性のまとめ

以上の検討から、表 2.3-1 にセメント適用部位自体の要求機能を充足させるための要求特性の整理結果を示す。

表 2.3-1 セメント適用部位自体の要求機能を充足させるための要求特性

部 位	要求機能	要求特性	
		施工時の要求特性	硬化後の要求特性
支保 コンクリート	・ 空洞安定性の確保	・ 混和剤との適合性 ・ 圧送可能な流動性	・ 所定の強度特性
インバートコン クリート	・ 空洞安定性の確保	・ 混和剤との適合性 ・ 圧送可能な流動性	・ 所定の強度特性
強度プラグ	・ 埋戻し材の膨出防止 ・ 止水プラグの変形防止	・ 混和剤との適合性 ・ 圧送および充填可能な 流動性	・ 所定の強度特性
グラウト	・ 湧水の抑制	・ 混和剤との適合性 ・ 対象亀裂への浸透性 ・ 圧送可能な流動性	・ 所定の強度特性
床版 コンクリート	・ 操業および閉鎖の 作業性の確保	・ 混和剤との適合性 ・ 圧送および充填可能な 流動性	・ 所定の強度特性
ロックボルト定 着材	・ 鋼棒の岩盤への 速やかな定着	・ 混和剤との適合性 ・ 圧送可能な流動性	・ 所定の強度特性

## 2.4 セメント系材料の変質により変化する特性に関する検討

ここでは、地下処分環境において想定されるセメントの変質現象（溶脱およびひび割れ）について概説し、変質がもたらす影響要因に起因する事象がセメント系材料の特性に及ぼす影響と、その他の材料（岩盤およびベントナイト系材料）の特性への影響を整理する。

### 2.4.1 セメント系材料の変質がもたらす諸影響要因

#### (1) セメント系材料を用いた硬化体から放出される各種影響要因

地下施設で使用されるセメント系材料は、長期間に亘り地下水に接触することが予想される。その地下水成分により、溶脱、二次鉱物生成による水和組織の脆弱化、ひび割れ発生など、様々な化学的および物理的変質作用がもたらされると推測される。ここでは、セメント系材料を用いた部材が周辺環境に化学的作用をもたらす要因を挙げ、その影響を定性的に示す。

#### 1) 水和物相の溶解成分

セメント硬化体が長期間水に接触する過程で3段階の変化（図 2.4-1）が生じる（Bauer and Berger, 1998）。

- ・ 第一段階：Na, K イオンと OH イオンが短期間に放出される。放出量および放出速度は、セメントに含まれるこれらの成分量と硬化体特性（拡散性状）に依存する。OH イオンの放出特性は、周辺環境（粘土鉱物など）に及ぼす影響を考慮する際に重要な因子となる。OH イオンは、付随イオンとして Na, K を伴うため、鉱物相の溶解とともにイライト、ゼオライトのような二次鉱物を生成させることで粘土鉱物の溶解速度を高める（Berner, 2004）。
- ・ 第二段階：ポルトランドイト（水酸化カルシウム）が溶脱する。この溶脱は比較的長い期間に亘り継続する。粘土鉱物との反応でカルシウムシリケート化合物（C-S-H）状の二次鉱物を生成させ、アルカリ影響を緩和する。スイスでは、中レベル放射性廃棄物（ILW）処分施設を Opalinus clay 層（粘土層）に埋設することを想定し、4m<sup>3</sup>のセメント固化物から放出されるアルカリ成分を緩衝するためには1m<sup>3</sup>の粘土層が必要になると解析している。
- ・ 第三段階：シリケートイオンとアルミネートイオンを放出する。これらのイオンを放出する期間も長く継続する。この段階では、外部環境に対する化学的な濃度勾配は緩和されているが、第一段階と比較して細孔構造が大きく変化し、粗大化するため、物質移行し易くなる影響に留意すべきである（Berner, 2004）。

図 2.4-1 に示される知見は、OPC を対象とした可溶成分の溶出挙動である。他のセメント系材料となるフライアッシュ、もしくは高炉スラグ微粉末を混和したセメント硬化体、およびシリカフュームを多量に混和した低アルカリ性セメント硬化体から溶出する成分の構成は、pH と併せて Ca と Si ならびに Al の溶出量比が異なると考えられる。Bauer and Berger (1998) は、水和物相中のエトリンガイトなどのカルシウムアルミネート相の存在割合は低い、イオンの放出挙動が複雑なために熱力学データが研究者間で大きく異なり、アルカリ影響でベントナイト中に生成する二次鉱物の評価の精度に影響を及ぼすと指摘している。



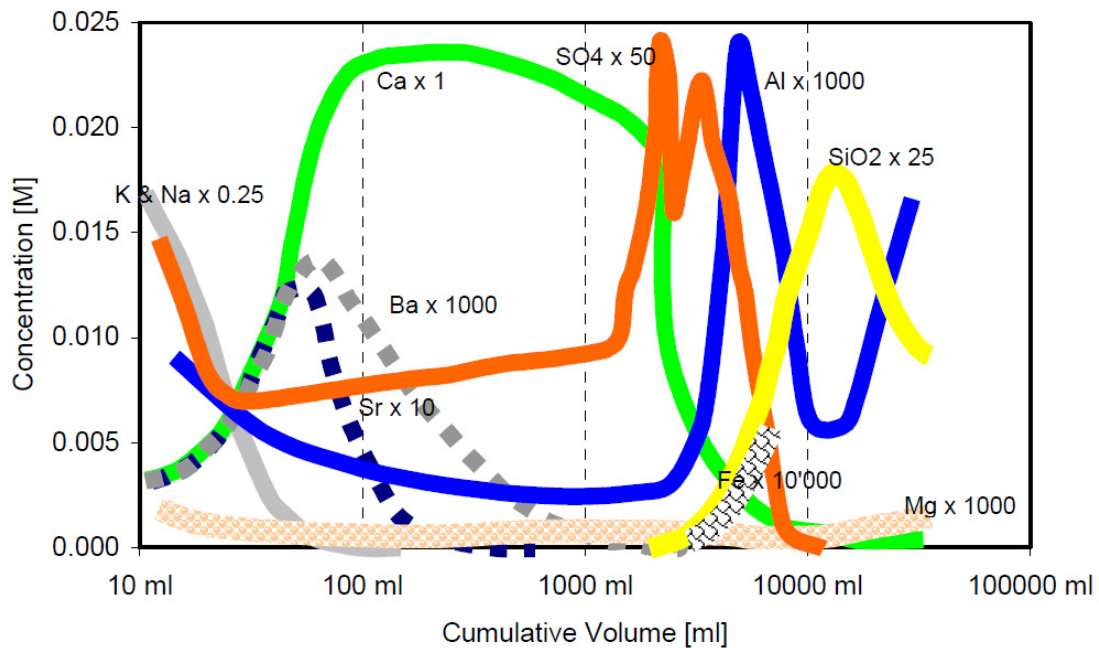


図 2.4-1 OPC 硬化体から溶出する各種成分の挙動  
(Berner, 2004)

円盤状セメント硬化体（体積 13ml）を脱気イオン交換水に 3 年間以上浸漬し，得られた元素濃度の変化を表している。元素濃度を各々の倍率（ $\times 0.25 \sim 10000$ ）で縮小，拡大表示することで一つの濃度スケールで表示している。

## 2) セメント硬化体に添加した有機化合物に起因する溶出成分

処分施設において使用されるセメント系材料には，高性能 AE 減水剤，AE 剤，消泡剤，減水剤，急結剤，硬化促進剤，遅延剤，超遅延剤，収縮低減剤，分離低減剤，セメント粉砕助剤などの有機化合物が含まれる可能性がある。これらの有機化合物のうち減水剤が比較的多く用いられ，界面活性剤としての機能を有するために放射性核種と錯体形成する傾向が強いと考えられている（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）。

開口幅の狭い亀裂に注入するセメント系材料のグラウト材は，使用材料の分散性ならびに注入性を高めるために高性能減水剤などの化学混和剤の使用が不可欠となる（Anderson et al., 2008）。また，支保コンクリートなどのコンクリート部材を地下施設で打設する際には，練混ぜ直後の生コンクリートを比較的長い距離のポンプ圧送を行うことが必要になることも想定され，施工性確保の観点で，高性能減水剤と併せて凝結遅延剤などの化学混和剤を使用すると考えられる。

高性能 AE 減水剤（以下，「SP」という）を添加したセメント系グラウト材料を岩盤亀裂に注入し，これに含まれる SP 成分などの有機化合物が地下水中で溶出する挙動を POSIVA の ONKALO サイトで調査した結果（図 2.4-2），注入後 2 年程度では，セメントに添加し

た高性能 AE 減水剤が原液の状態では溶出しなかった (Anderson et al., 2008)。グラウト材に添加したナフタレンスルホン酸系, およびメラミンサルフォネート系高性能 AE 減水剤には, 各々分子量 8,000, 22,000 となる巨大な高分子が主要成分として含まれる (図 2.4-3, 図 2.4-4) (Anderson et al., 2008)。グラウト材注入して, 約 2 年経過後にグラウト注入部近傍で採取した地下水をゲル浸透クロマトグラフィー (Gel Permeation Chromatography, 以下, 「GPC」という) で分析した結果では, 分子量の大きな有機化合物は検出されず, 地下水に元来存在する低分子量の有機化合物が主に検出された (図 2.4-5) (Anderson et al., 2008)。その分析結果では, 低分子量の有機化合物については, 高性能 AE 減水剤の主要成分の分解による, もしくは高性能 AE 減水剤製造時に未反応の状態の不純物として微量に含まれる原材料, または, セメント粉砕助剤が溶出したことによると推測されるアミノメチレン基が検出された (Anderson et al., 2008)。このように, 高性能 AE 減水剤の主要成分となる分子量の大きい有機化合物は, 未変質な状態ではセメント硬化体から溶出しづらい特性を有している。しかし, 放射性核種との錯体形成に関する検討を行う場合には, 有機化合物の長期の変質を考慮する必要があるので, 試験結果の解釈には留意が必要であると考えられる。

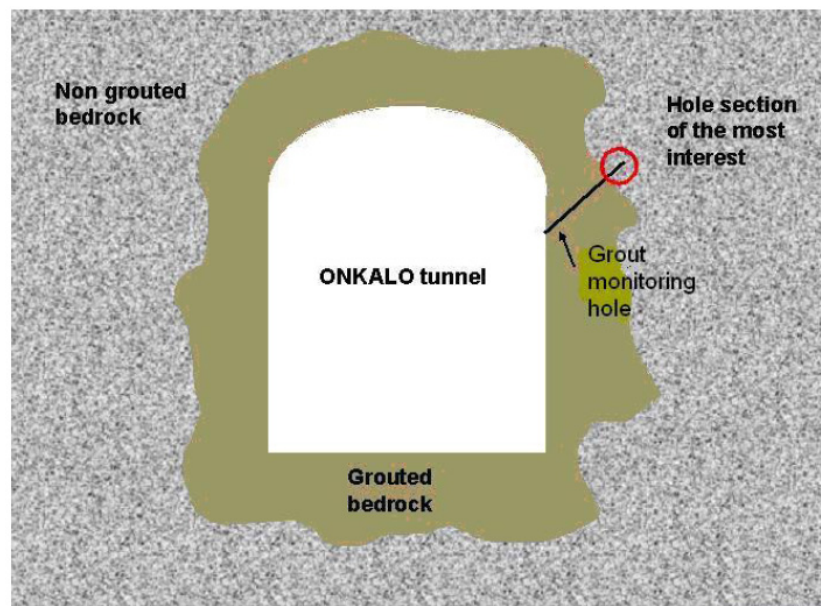


図 2.4-2 POSIVA の ONKALO サイトでのグラウト材添加有機化合物の溶出性評価試験の概念図  
(Anderson et al., 2008)

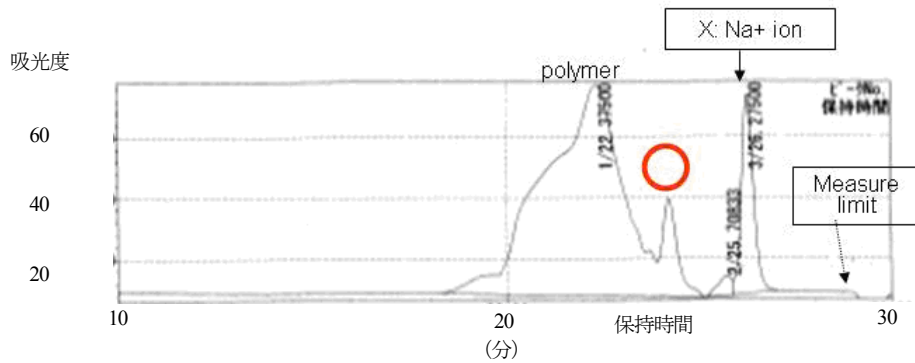


図 2.4-3 グラウト材に添加したナフタレンスルホン酸系高性能減水剤に含まれる有機化合物の分子量分析結果 (Anderson et al., 2008)  
(GPC (Gel Permeation Chromatography) 分析装置による分析結果)

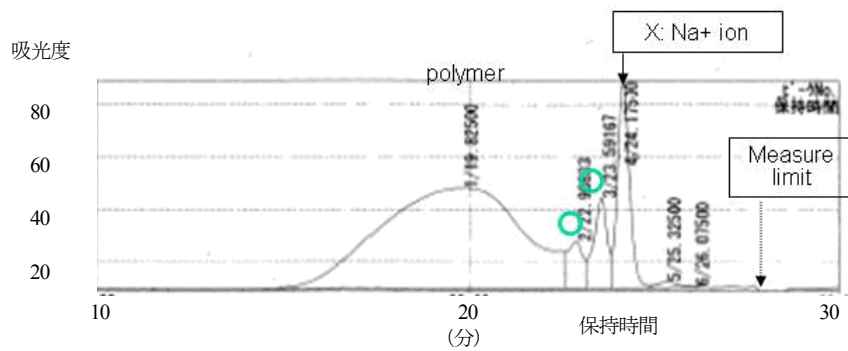


図 2.4-4 グラウト材に添加したメラミンサルフォネート系高性能減水剤に含まれる有機化合物の分子量分析結果 (Anderson et al., 2008)  
(GPC (Gel Permeation Chromatography) 分析装置による分析結果)

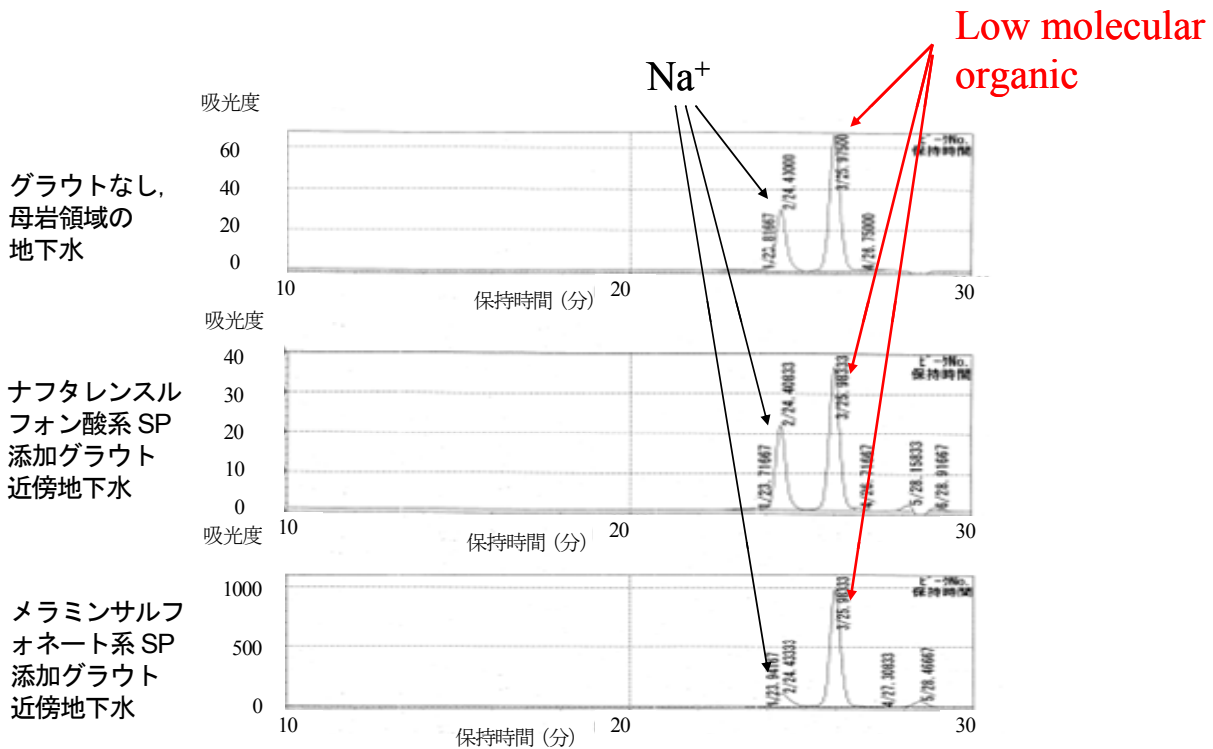


図 2.4-5 グラウト材の近傍およびグラウト材の無い母岩における地下水中の有機成分分子量の分析結果 (Anderson et al., 2008)  
 (GPC (Gel Permeation Chromatography) 分析装置による分析結果)

ナフタレンスルホン酸系、メラミンサルフォネート系、ポリカルボン酸系 SP を添加した OPC およびシリカフェーム多量混合系の低アルカリ性セメント硬化体に関して、浸漬時の浸漬液に対する接触比表面積を高めて各種化合物の溶出挙動を促進させるために粉末状に粉碎した試料をイオン交換水に浸漬し、有機化合物の溶出特性を 2004～2005 年度に POSIVA, SKB, 原子力発電環境整備機構の共同研究で検討している (Anderson et al., 2008)。その結果、ナフタレンスルホン酸系 SP を添加した硬化体からは、SP 製造で使用した原材料の未反応物と推測される低分子量のナフタレンスルホン酸種の 2 量体とセメント粉碎助剤が溶出した。また、比較的脆弱な分子構造となるメラミンサルフォネート系 SP を添加した硬化体からは SP 製造で使用した原材料の未反応物、もしくは SP の分解成分と推測されるメチロールアミン類とセメント粉碎助剤が溶出した。そして、ポリカルボン酸系 SP を添加した硬化体からは、SP 製造時から残存している原材料の未反応物質とセメント粉碎助剤が溶出した。

これらの検討結果から、高性能減水剤を添加したセメント硬化体が溶脱変質する過程で放出する有機化合物は、比較的分子量の小さい SP 製造で用いられる原材料の未反応物と併せてセメント製造時に添加される粉碎助剤であり、さらに長期に亘って生じる溶脱変質の過程では、SP の主要成分となるポリカルボン酸などの高分子が経年劣化により分解する

と推測され、低分子量化した場合に溶出すると考えられる。

このように現状では、セメント系材料に添加された SP などの有機化合物が硬化体から溶出する現象が知られている。しかしながら、溶出した有機化合物の化学的状態の評価、ならびにその溶出成分が各部材の特性に及ぼす影響や、母岩の核種移行抑制機能に及ぼす影響に関してはほとんど知見が得られていない。

## (2) セメント系材料の溶脱に起因する諸特性への影響

### 1) 溶脱変質に伴う多孔化現象

セメント硬化体は溶脱変質に伴い、多孔化する。普通セメントおよび低アルカリ性セメントを使用した薄板状試験体をイオン交換水、降水系模擬地下水、海水系模擬地下水（表 2.4-1, Anderson et al., 2008）に浸漬したいずれの場合でも、比較的微細な空隙の量が減少し、比較的粗大な空隙の量が増大する空隙の粗大化現象が認められた。これは、上述 2.4.1(1) に示す水酸化カルシウムならびに C-S-H 相の溶脱変質（図 2.4-6, 図 2.4-8, Anderson et al., 2008）に伴う水和物相の減肉現象（図 2.4-7, 図 2.4-9）であり、セメント硬化体の密度低下ならびに強度低下、そして、物質移行性を高める要因となる。

表 2.4-1 降水系模擬地下水 (ALL-MR) および海水系模擬地下水 (OL-SR) の溶液組成 (mg/dm<sup>3</sup>)  
(Anderson et al., 2008)

	Na	Ca	K	Mg	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	B	F	Br	Sr	Cl	Si
降水系	55.2	5.14	3.91	0.71	65.0	4.20	-	-	-	-	48.9	2.39
海水系	4800	4000	21.0	54.6	-	9.60	0.92	1.19	105	35.0	14726	-

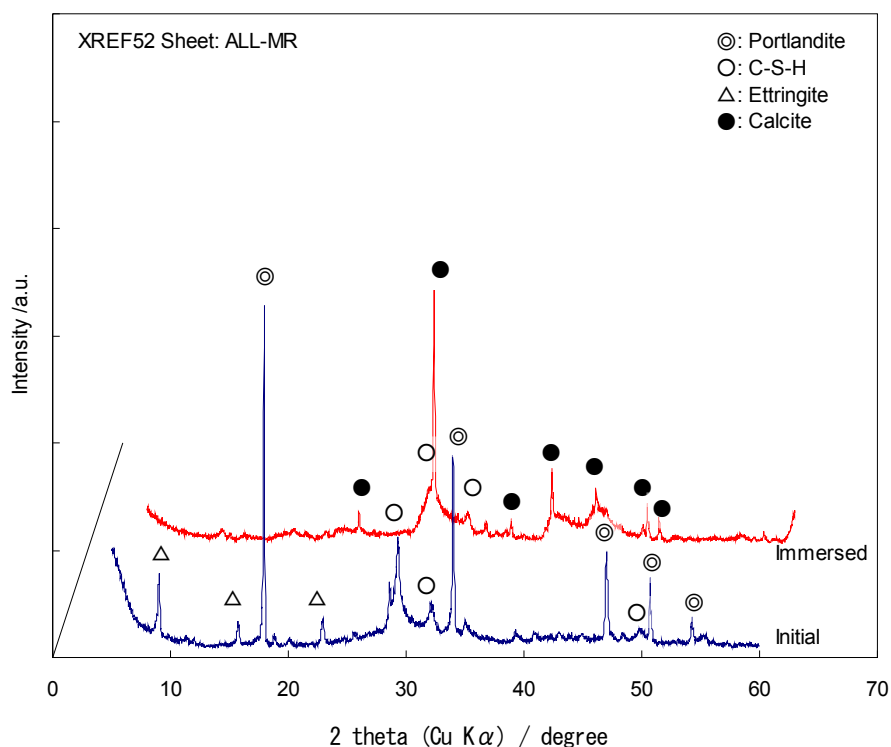


図 2.4-6 降水系模擬地下水に浸漬した薄板状普通セメント硬化体の構成相の変化  
(Anderson et al., 2008)

(初期試料に存在したエトリンガイト，ポルトランドイトが消失し，カルサイトが生成した。  
また，ハイドロタルサイト (hydrotalcite) 状の非晶質構造を有する変質物が検認できる。)

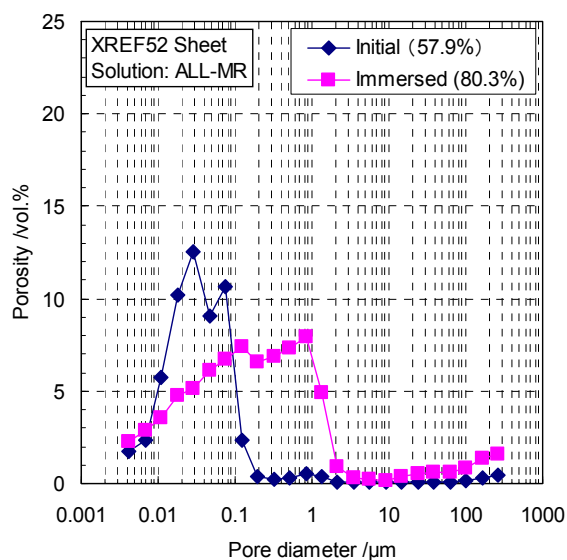


図 2.4-7 降水系模擬地下水に浸漬した薄板状普通セメント硬化体の細孔径分布の変化  
(Anderson et al., 2008)

(孔径 0.01~0.1 μm の範囲で減少し，0.1~20 μm の範囲で増加した。  
溶脱変質の進行に伴う空隙の粗大化現象を確認した。)

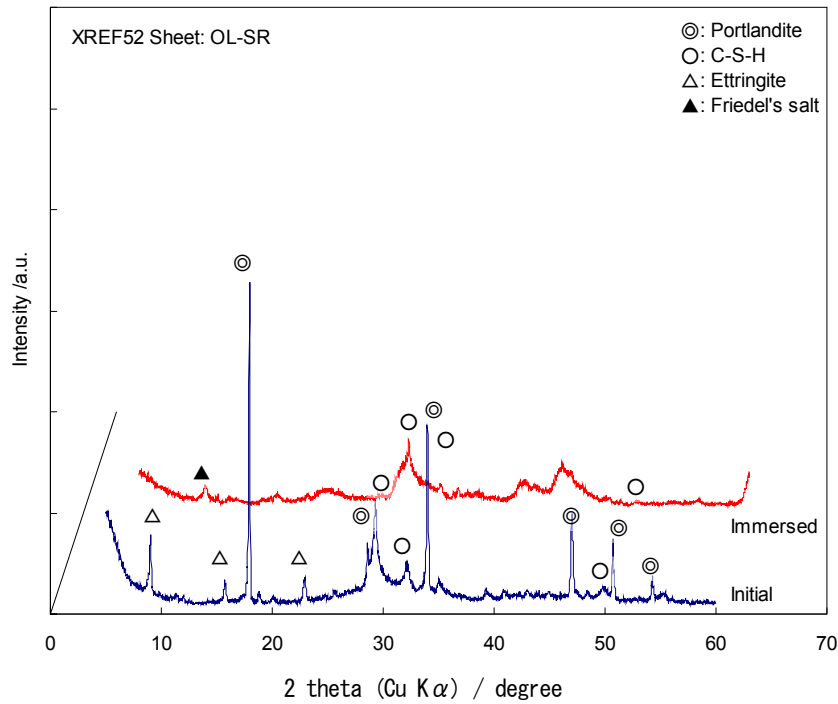


図 2.4-8 海水系模擬地下水に浸漬した薄板状普通セメント硬化体の構成相の変化  
(Anderson et al., 2008)

(初期試料に存在したエトリンガイトはフリーデル氏塩に変化し、ポルトランダイトが消失した。また、  
 ハイドロタルサイト (hydrotalcite) 状の非晶質構造を有する変質物が検認できる。)

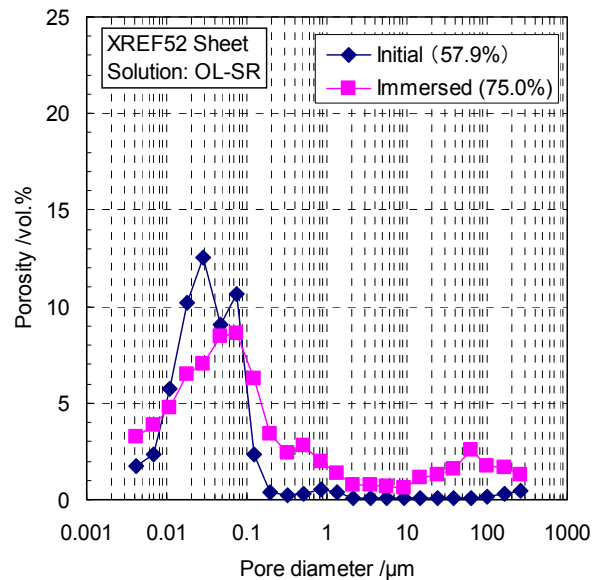


図 2.4-9 海水系模擬地下水に浸漬した薄板状普通セメント硬化体の細孔径分布の変化  
(Anderson et al., 2008)

(孔径 0.01~0.1  $\mu\text{m}$  の範囲で減少し、0.1~200  $\mu\text{m}$  の広範囲で増加した。溶脱変質の進行に伴い、空隙の粗大化が生じるが、降水系とは異なる状態になると考えられる。)



Lagerblad (2001) は、1910年に打設された貯水槽コンクリートに吹付けた厚さ 25 mm のモルタル層の変質深さ、ならびに変質相の組成分析を行った。接触する水の組成は、表 2.4-2 に示すように Ca, Na, K, Mg 濃度が各々 15, 9.1, 2.3, 4.0 mg/l となる淡水である。モルタル表層部から内部にかけて特性 X 線分析装置付きの走査型電子顕微鏡 (SEM-EDS) により各分析点における化学組成比を求めた (図 2.4-10)。分析時点まで約 90 年間水に接触しており、CaO 含有率の低下をもたらす溶脱変質はモルタル表層部の約 7mm であった。さらに、モルタル表層部 3 mm は CaO 含有率が 10 %以下と非常に低く、SiO<sub>2</sub> 含有率が約 50 %以上、MgO 含有率が約 15 %以上、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含有率が 10 %以上となる高い値を示し、健全なままとなる内部のモルタルに比べて大きく異なる組成であった。なお、同貯水槽で 1927年に打設されたコンクリート吹付けモルタルの表層部の実態像 (図 2.4-11) を観察すると、表層部が骨材を残して非常に凹凸に富んだ形状を呈している。これは溶脱変質が進行することでペースト部が消失し骨材が取り残された状態に至っていると推察できる。なお、Lagerblad (2001) が示した図 2.4-10 のデータなどを基に、同モルタルは実際には溶脱変質深さ 7 mm 以上の範囲まで溶脱変質が進行し、表層部のペースト部は微量ではあるが溶解して消失したと推察される。

表 2.4-2 スtockホルム郊外 Norsborg の貯水槽コンクリートが接触する水質、  
1997年6月11日の分析結果 (単位: mg/l) (Lagerblad, 2001)

Ca	15 mg/l	Al	0.02 mg/l	Cl	12 mg/l
Mg	4.0	Cu	0.002	F	0.27
Na	9.1	Si	0.03	NH <sub>4</sub> -N	0.02
K	2.3	HCO <sub>3</sub>	43	NO <sub>3</sub> -N	0.06
Mn	0.011	SO <sub>4</sub>	21	PO <sub>4</sub> -N	0.001
Fe	0.04	O <sub>2</sub> (g)	10.9	pH	7.7



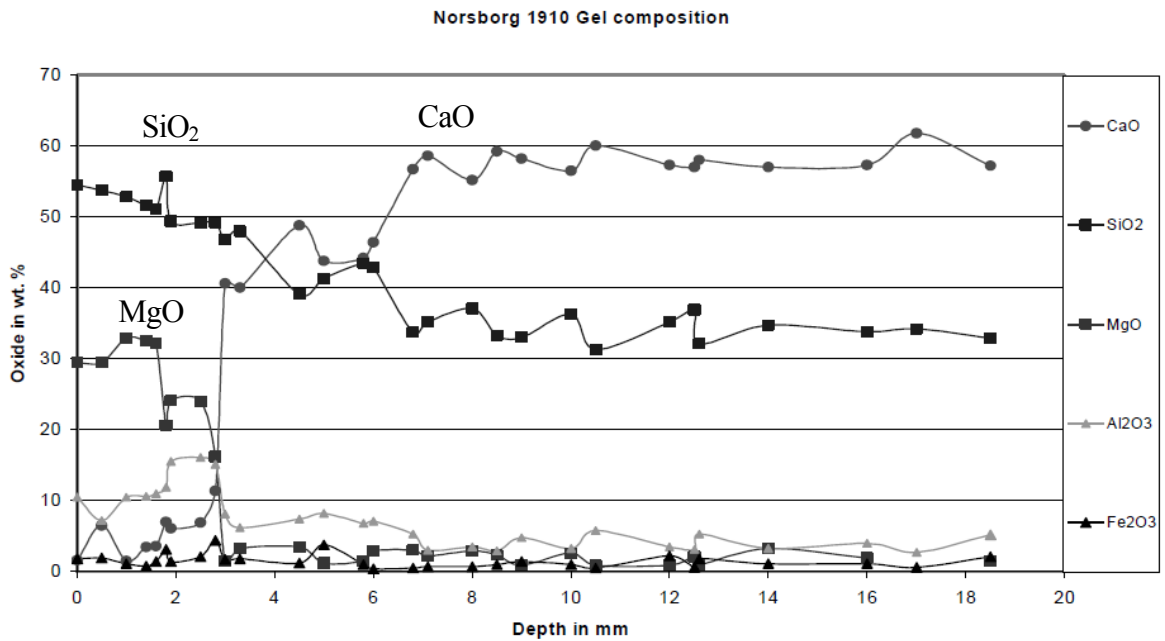


図 2.4-10 1910年に打設されたストックホルム貯水槽コンクリート吹付けモルタルの溶脱変質部における化学組成比 (Lagerblab, 2001)

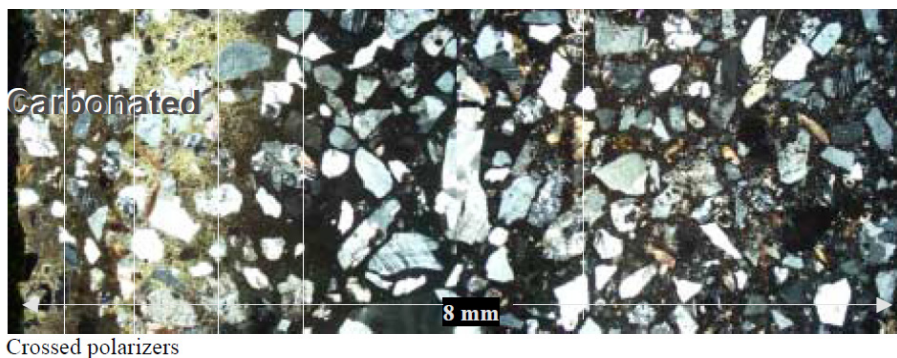


図 2.4-11 スtockホルムの貯水槽コンクリート吹付けモルタル (試料名: 1927年-2) の溶脱変質部の偏光顕微鏡写真 (Lagerblab, 2001)

明るい色調部分は粗大空隙が存在する箇所である。画像中の暗い色調部分はポルトランドイト(複屈折性結晶)が消失した箇所を示す。

山本・廣永(2008)は、2 cm角ブロックのOPCペースト試験体をイオン交換水に浸漬し、2~3週間ごとに浸漬液を全量交換することで浸漬液と固相中間隙水の間での濃度勾配を高めた状態を維持する促進溶脱試験を行い、82週間の浸漬によって水結合材比80%の硬化体では浸漬液との接触面から深さ10 mmの深さまで溶脱変質フロントが達することを示した(図2.4-12)。また、立方体形状の試験体の全面から溶脱が進行するため、変質フロントが中央部に近づくと特定面に対して近接する4面から進行した変質フロントと干

渉することで溶脱変質速度が高まると考えられる。このような試験体の形状の制約から浸漬期間 26 週までの範囲に限られるが、いずれの水結合材比の硬化体においても溶脱変質フロントは、時間の平方根に比例する形 ( $\sqrt{t}$  則) で進行することも示した。

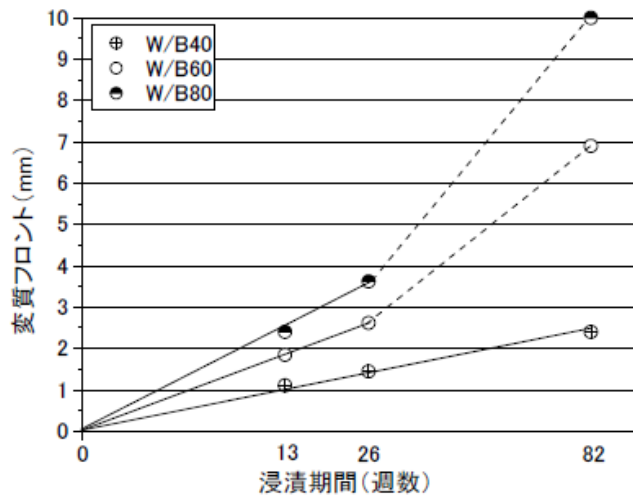


図 2.4-12 イオン交換水中（液交換有り）での OPC ペースト硬化体の溶脱変質フロント進行量の比較（山本・廣永，2008）（W/B は水結合材比を表す。横軸は、 $\sqrt{t}$  表示である。）

図 2.4-13 には、EPMA による OPC ペースト接水面表層部の分析結果を示す（山本・廣永，2008）。それから分かるように、OPC ペーストの接水面極近傍では、水酸化カルシウム（ポルトランダイト）の消失と併せて C-S-H 相の溶脱変質が生じるため、孔径  $10\mu\text{m}$  程度の空隙が多く形成され、その内部、溶脱変質フロントに向かうと水酸化カルシウムの溶脱痕が選択的に形成され、さらに内部に向かうと健全な状態が保持されている（図 2.4-13）。溶脱変質フロントは、溶解度の高い水酸化カルシウムが表層部から連鎖的に消失し、その消失痕が内部に向かって進展する過程で形成される。この変質状態のモデル図を図 2.4-14 に示す。図 2.4-13 には、フライアッシュを混和した場合の分析結果を併せて示したが、溶脱変質フロントの進行速度が遅くなるため、水酸化カルシウムの消失領域と C-S-H 変質領域が混在した状態になっている（山本・廣永，2008）。フライアッシュを混和した場合は、混和されたフライアッシュの体積の分だけ C-S-H 相と水酸化カルシウム量が減少した状態になり、さらにセメント粒子間にフライアッシュ粒子が入り込むことでセメントの水和反応の過程で水酸化カルシウムの結晶粒の団粒化を抑制する効果をもたらしていると考えられる。このような水酸化カルシウム生成量、ならびに団粒径の減少とともにフライアッシュのポゾラン反応による水酸化カルシウムの C-S-H 化による結晶量の低下、そして組織の緻密化作用（山本・金津，2007）によって水酸化カルシウム消失の連鎖が抑制される効果をもたらされると考えられる。このように、溶脱変質フロントの進行は、フライアッシュなどのポゾランを混和したセメント硬化体に比べて OPC 硬化体で顕著に認められる。

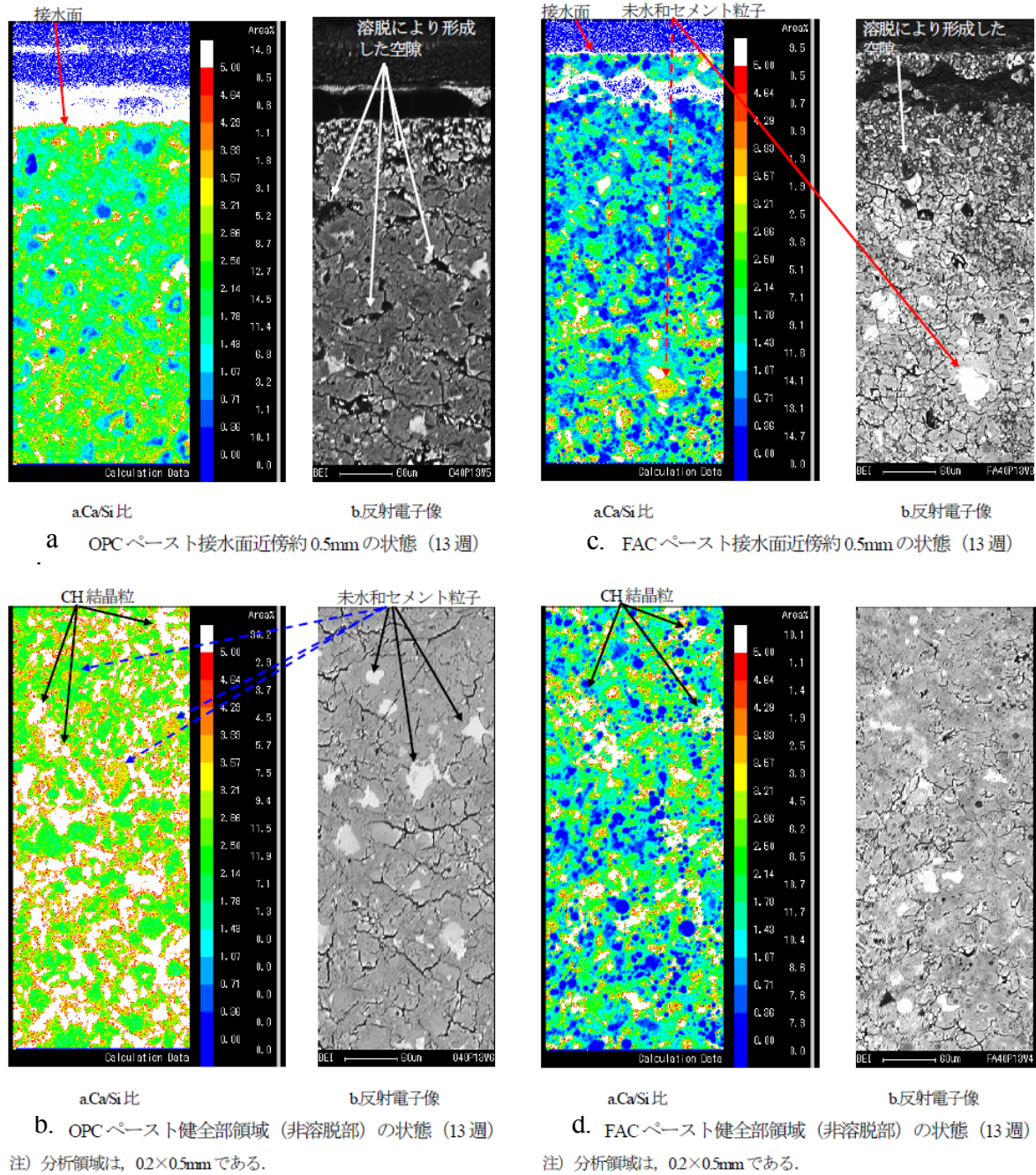


図 2.4-13 OPC とフライアッシュ混和セメントペーストの溶脱変質に伴う Ca/Si 比の変化と空隙形成状態の比較 (山本・廣永, 2008)

注) OPC : a (変質部) , b (健全部) FAC : c (変質部) , d (健全部)



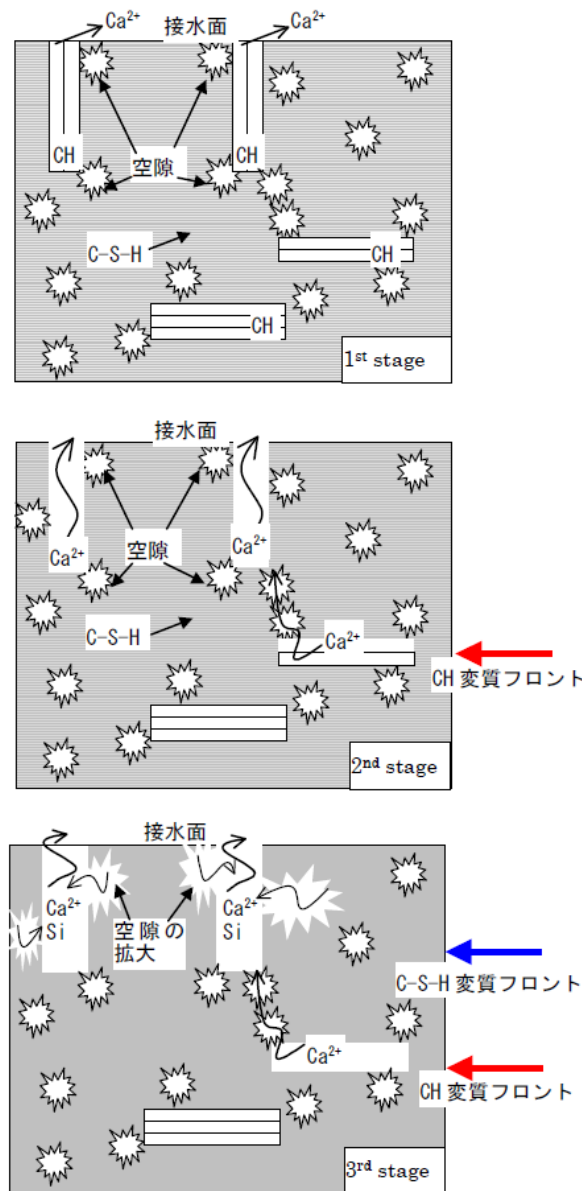


図 2.4-14 セメント硬化体における溶脱変質フロントの進行モデル図（山本・廣永，2008）

## 2) 多孔化に伴う水理的および力学的特性の変化

セメントの溶脱により、セメント硬化体の空隙が増加する場合には、その透水性が上昇することが想定される。安田ほか（2002）は、OPC およびそれらの一部にフライアッシュを置換したフライアッシュセメント（FAC）を用いたモルタルを製作し、その透水係数の測定試験を実施した。同試験にて得られた空隙率と透水係数の関係を図 2.4-15 に示す。これによると、空隙率と透水係数には高い相関があることがわかる。

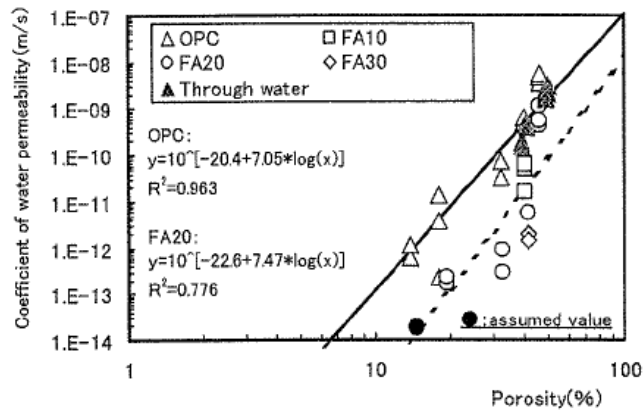


図 2.4-15 空隙率と透水係数の関係

(安田ほか, 2002)

また、近藤ほか (1971) は、セメントの代表的鉱物相でカルシウムとシリカの化合物となるエアライト、ならびに早強セメント (図中 SRH) を使用したモルタル供試体の全空隙率 (7.5nm~7.5 $\mu$ m) と圧縮強度の関係を実験により示しており、これによると空隙率と圧縮強度には相関が認められる (図 2.4-16 参照)。材料の圧縮強度は引張強度、静弾性係数といった力学的特性を代表するものであるから (土木学会エネルギー委員会, 2009)、空隙の増大により材料の力学的性能が低下すると言える。

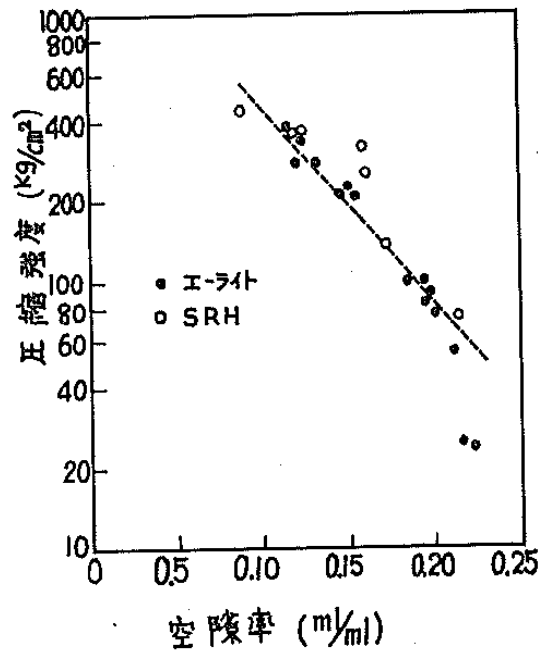


図 2.4-16 合成エアライト, 早強セメント使用モルタルの全細孔容積率と圧縮強度の関係

(近藤ほか, 1971)

### (3) セメント硬化体のひび割れに起因するセメント系材料の特性への影響

一般に、セメント系材料に発生するひび割れとして、乾燥収縮ひび割れ、自己収縮ひび割れ、温度ひび割れおよび材料の沈降など、コンクリートの配合ならびにセメントの反応特性に起因するものの他、地下水中およびセメント系材料中の硫酸成分との反応、アルカリ骨材反応および thomasite の生成など膨張性の鉱物の生成に伴うもの、鉄筋の腐食膨張に伴うものが考えられる（日本コンクリート工学協会，2009），（土木学会，2003）。

ひび割れは材料の連続性を分断するものであるから、その頻度が多い、あるいは、その規模が大きい場合には、材料の力学的性能を有意に低下させるものと考えられる。また、開口したひび割れは流体の移行経路となり、部位の透水性を著しく増加させる（図 2.4-17）（樋原ほか，2009）。

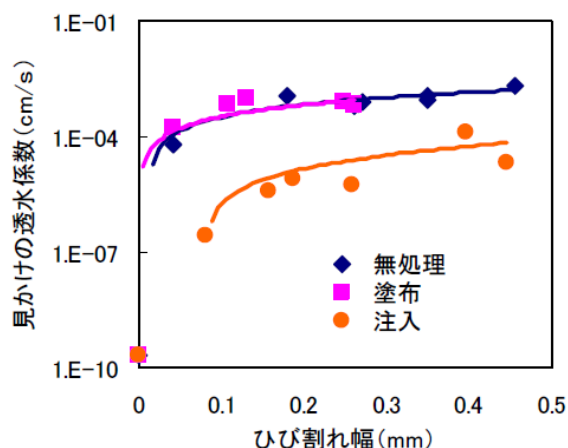


図 2.4-17 セメント硬化体のひび割れ幅と透水係数の関係の例（樋原ほか，2009）

注) ケイ酸塩系含浸材の塗布、注入、無処理での比較試験

## 2.4.2 セメント系材料の変質に起因する他材料の特性への影響

### (1) セメントの溶脱に伴う空隙の増加による影響

セメント系材料が他の材料と接触して配置され、接触する他材料から外力を受ける場合に、セメント系材料が溶脱し、その力学的性能が低下すれば、接触する他材料の変形を引き起こすことが想定される。この時、接触する他材料では変形に伴う密度低下が生じ、結果として、その部分の透水／拡散性が增大することが考えられる。図 2.4-18 にセメント系材料の溶脱に伴う空隙の増加による影響事象の概念を示す。

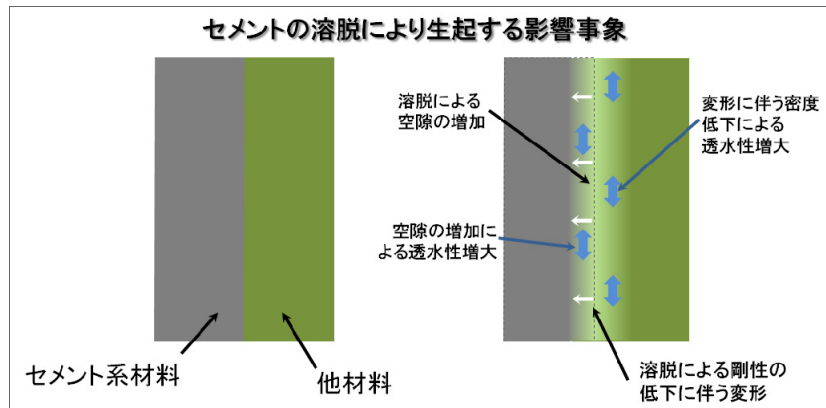


図 2.4-18 セメント系材料の溶脱に伴う空隙の増加による影響事象の概念

## (2) セメントの溶脱に伴う高アルカリ成分の溶出による影響

### 1) ベントナイト系材料への影響

セメント系材料硬化体から溶出するアルカリ成分は、セメント硬化体に接するベントナイト系材料に含まれる鉱物の溶解と二次鉱物生成をもたらす。ベントナイトのアルカリ変質に係る実験的研究および天然事例でみられる鉱物変化の概念図を図 2.4-19 (小田ほか, 2005) に示す。低温下では、スメクタイト→イライト/フィリップサイトという変化が生じ、時間の経過とともにフィリップサイト→カリ長石という変化が生じる。天然事例では、ガラス→スメクタイト→イライト、およびガラス→沸石→長石という変化が生じ、時間が経過し、埋設深度が深く、温度が高くなるにつれてこれらの反応が進行することが知られている (小田ほか, 2005)。

横山ほか (2011) は、Na 型ボルクレイ混合土と Ca 型ボルクレイ混合土の初期有効モンモリロナイト密度を各々  $0.31 \text{ Mg/m}^3$ 、 $0.30 \text{ Mg/m}^3$  に調整し、 $300 \text{ mmol/l}$  の NaOH 溶液および  $5 \text{ mmol/l}$  の  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液を各圧密試料に通水した際に生じる密度の変化と透水係数の変化を測定した。NaOH 溶液を通水した場合は、モンモリロナイトとその他の鉱物の溶解に伴う有効モンモリロナイト密度の低下と透水係数の増加傾向が認められたが、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液を通水した場合はモンモリロナイト有効密度の低下と透水係数の減少傾向が認められた。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  を通水した場合は、モンモリロナイトなどの鉱物の溶解とともにその溶解成分と Ca が結合し、二次鉱物として C-S-H が沈殿することで間隙が閉鎖されることを確認した (図 2.4-20, 図 2.4-21)。

アルカリ環境下でのスメクタイト溶解への pH の影響は、Bauer and Berger (1998), Huertas et al. (2001), Sato et al. (2003, 2004) で検討されており、中性域から高アルカリ性領域の範囲で、溶解速度が温度に依存し、温度が高いほど溶解速度が高まることを示している。

このように、アルカリ成分によりベントナイト系材料が溶解することに伴い空隙構造が

変化し、その結果として、透水性および拡散性が変化すると考えられる。なお、アルカリ成分によりによりベントナイト系材料の収着分配特性や核種の溶解度が変化することが想定されるが、これらの現象は本検討においては考慮に入れないこととした。

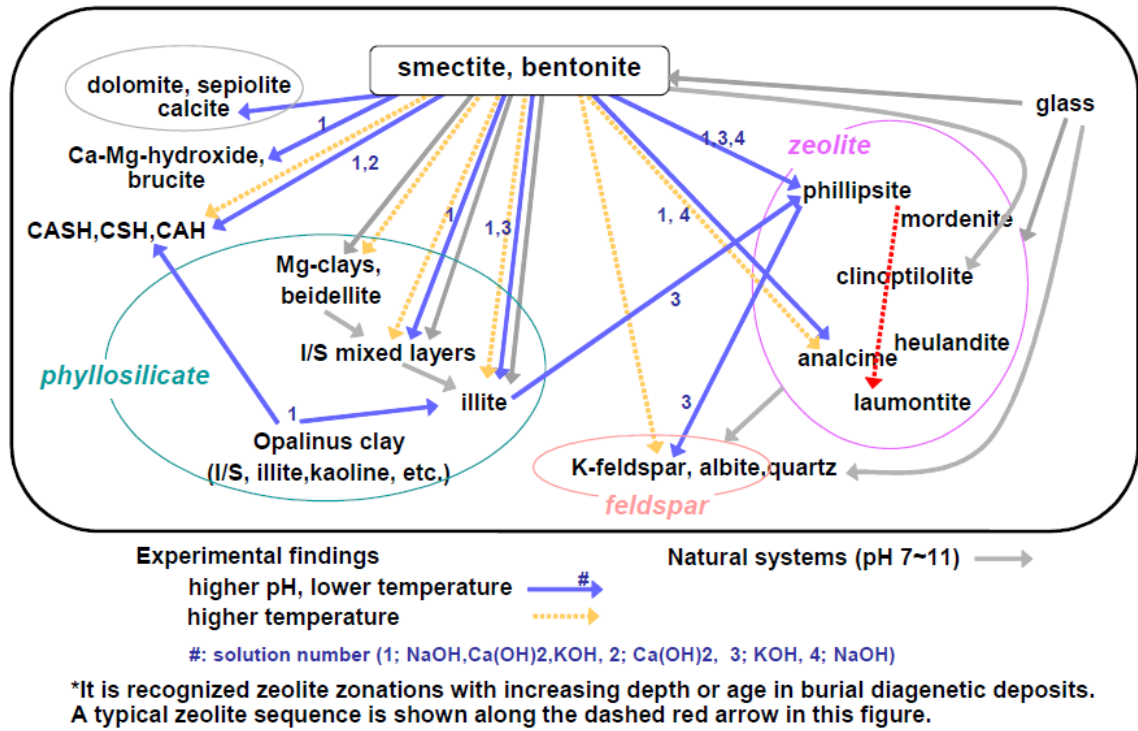


図 2.4-19 実験的研究および天然事例に基づく鉱物（スメクタイト，ベントナイト）のアルカリ変質過程の概念図（小田ほか，2005）



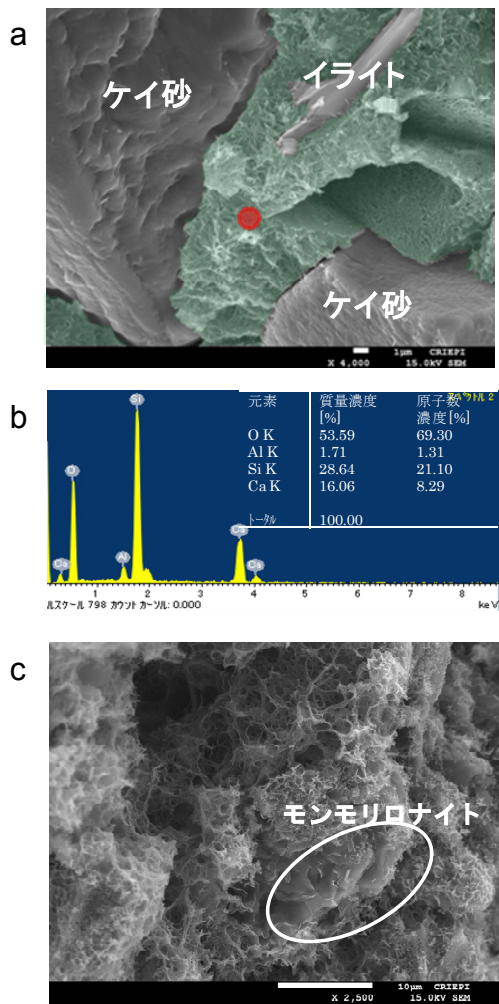


図 2.4-20  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液が圧密ベントナイト試料に接触する過程でモンモリロナイト近傍に生じた C-S-H (横山ほか, 2011)

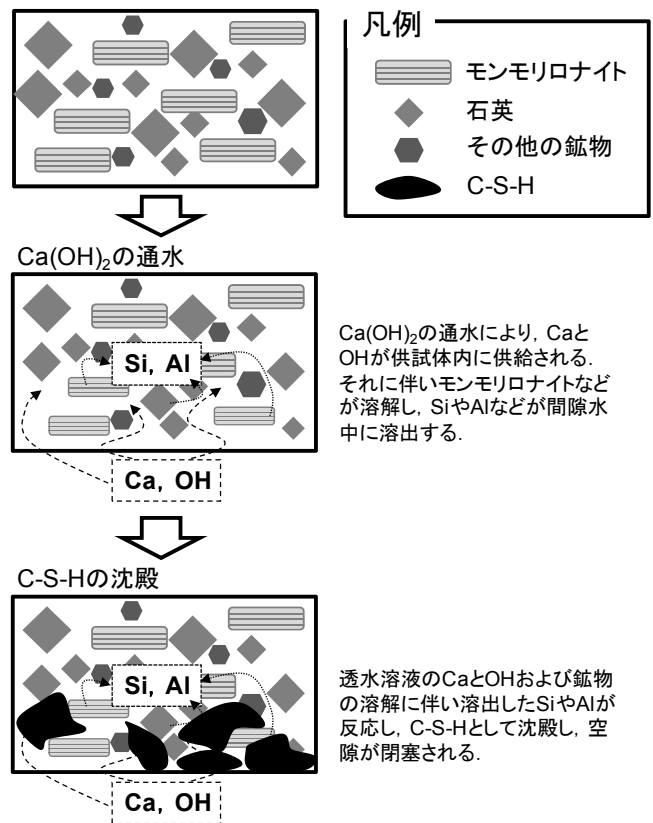


図 2.4-21 Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液が圧密ベントナイト試料に接触する過程で生じる C-S-H 沈殿の概念図  
(横山ほか, 2011)

## 2) 岩盤への影響

Gaboreau et al. (2011) は、フランスの Tournemire 地下研究所で泥岩層 (Toarcian argillite) に設けた掘削孔にセメント (OPC) ペーストを充填し、15 年間経過した後にその掘削孔近傍のコアを採取し、セメントペーストと母岩の界面近傍で生じた相互作用を分析した (図 2.4-22)。セメント界面から母岩に向かい約 1.5 cm の範囲で泥岩が黒色化しており、アルカリ変質に伴う変色が認められた (図 2.4-23)。この界面近傍の試料に <sup>14</sup>C と <sup>3</sup>H を含むメチルメタクリレートを含浸させ、鏡面仕上げした後に微細空隙に入り込んだこれらの放射性物質の量をオートラジオグラム (放射線写真法) で測定することにより、セメントと母岩界面近傍における単位面積当たりの空隙量の分布を評価した。セメント・母岩界面近傍のセメントペーストでは、密度の低下と空隙量の増加、および飽和度 (全空隙量に対する単位体積当たりの含水量) の低下が認められた。一方、母岩側では、密度の低下と空隙率の低下、そして飽和度の上昇傾向が認められた (図 2.4-24, 図 2.4-25)。放射線写真法で分析した空隙率分布測定結果から、界面近傍約 1.5 cm で空隙率の上昇域が形成され、EDZ による微細亀裂部分は比較的空隙率が高いが、微細亀裂の近傍で空隙率が低下した領域が形成されている (図 2.4-26) ことが確認された。この母岩における密度低下は、アルカリ変

質の過程で C-S-H およびゼオライトが生成したことによると推察されている。

このように、アルカリ成分により岩盤中の鉱物が二次鉱物を生成することなどにより空隙構造が変化し、その結果として、透水性および拡散性が変化するといえる。また、アルカリ成分による pH 変化にともなう収着分配特性や核種の溶解度の変化については、前述のベントナイト系材料の検討のケースと同様に、考慮に入れないこととした。

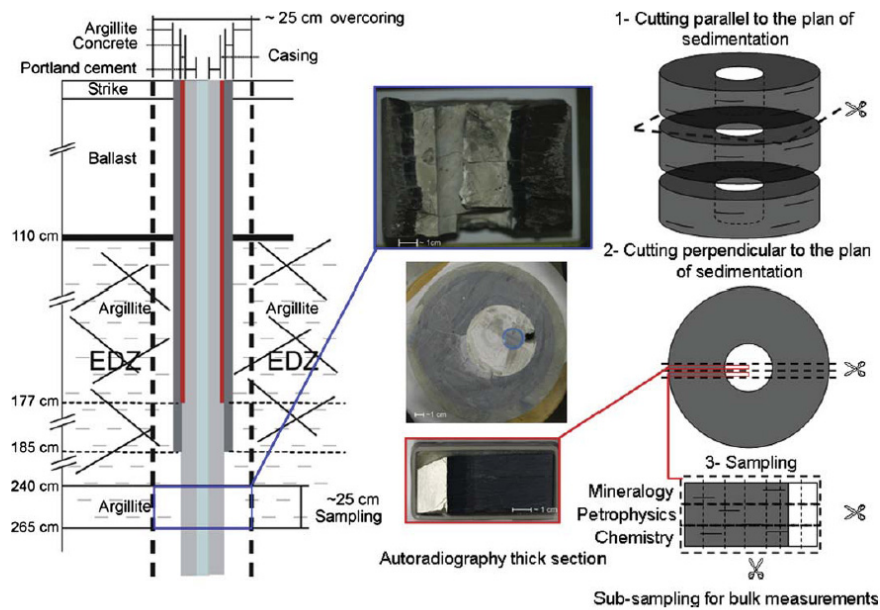


図 2.4-22 泥岩層にセメントペーストを注入後 15 年間経過した接触試料の採取方法 (Gaboreau et al., 2011)

(1)掘削孔横断面での切断, (2)掘削孔方向での切断

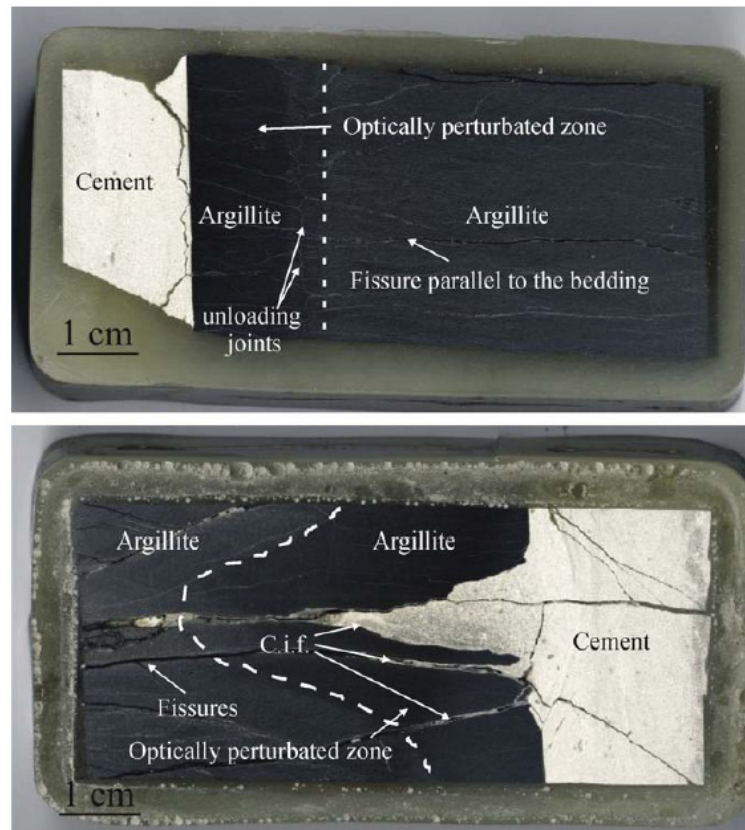


図 2.4-23 セメント・泥岩界面近傍の放射線写真法分析用試料 (Gaboreau et al., 2011)

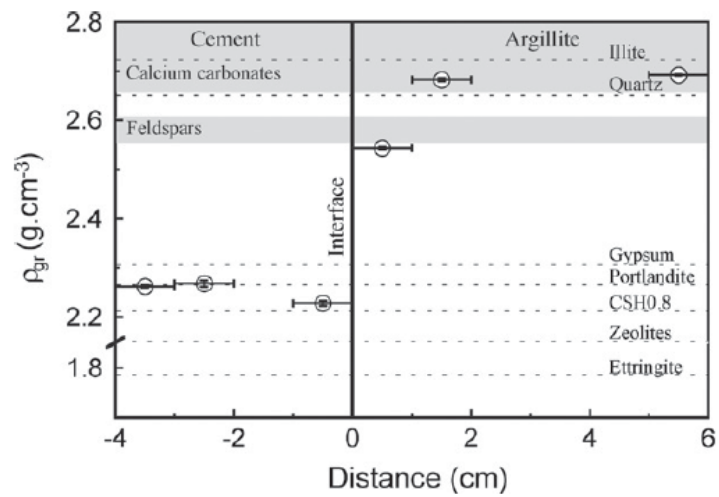


図 2.4-24 セメント・泥岩界面近傍における粒子密度分布 (Gaboreau et al., 2011)

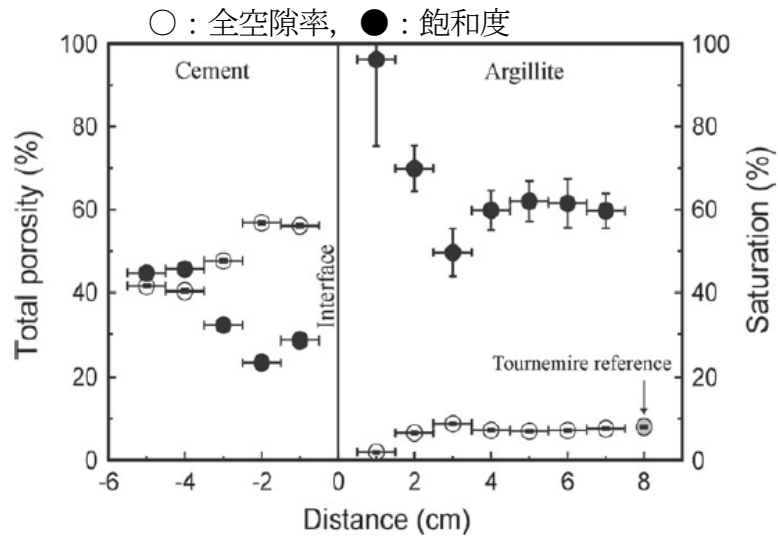


図 2.4-25 セメント・泥岩界面近傍における全空隙率分布（実態顕微鏡観察による評価）  
 (Gaboreau et al., 2011)

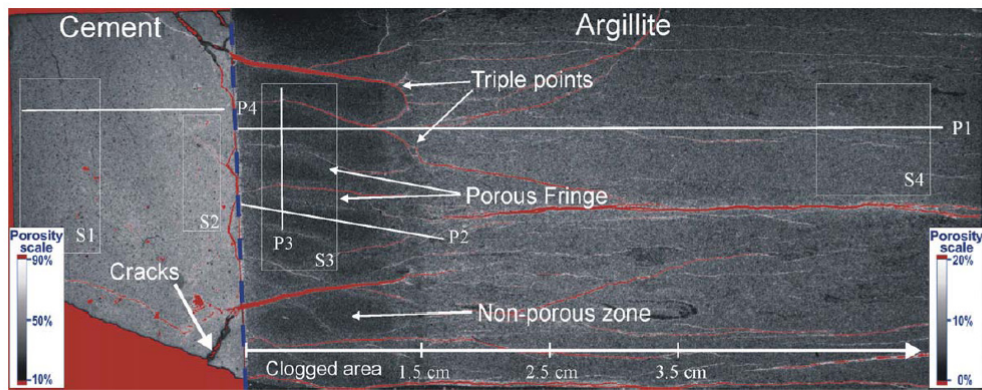


図 2.4-26 セメントと母岩界面近傍における空隙量分布図（放射線写真法による評価）  
 (Gaboreau et al., 2011)

### (3) セメント硬化体のひび割れに起因する他材料の特性への影響

セメント系材料が他の材料と接触して配置され、接触する他材料から外力を受ける場合に、セメント系材料のひび割れにより、その力学的性能が低下すれば、接触する他材料の変形を引き起こすことが想定される。この時、接触する他材料では変形に伴う密度低下が生じ、結果として、その部分の透水性が増大することが考えられる（図 2.4-27）。

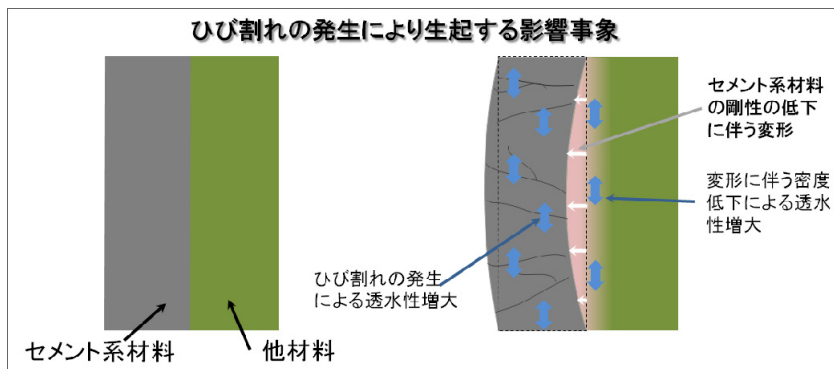


図 2.4-27 ひび割れの発生により生起する事象のイメージ

### 2.4.3 特性変化の低減策の検討

2.4.1 および 2.4.2 で整理したセメント系材料の変質により生起する事象の因果関係を図 2.4-28 に示す。本項では、これを基にセメント系材料に対して施すべき、特性変化の程度を低減する方策（以下、「特性変化低減策」という）を検討する。なお、セメント系材料の透水性の増大に起因する他材料への影響と、セメント溶脱に起因する混和剤の溶出による他材料への影響については、現状ではその影響に関する知見が不十分と考えられるため、以降の検討では考慮しないこととした。

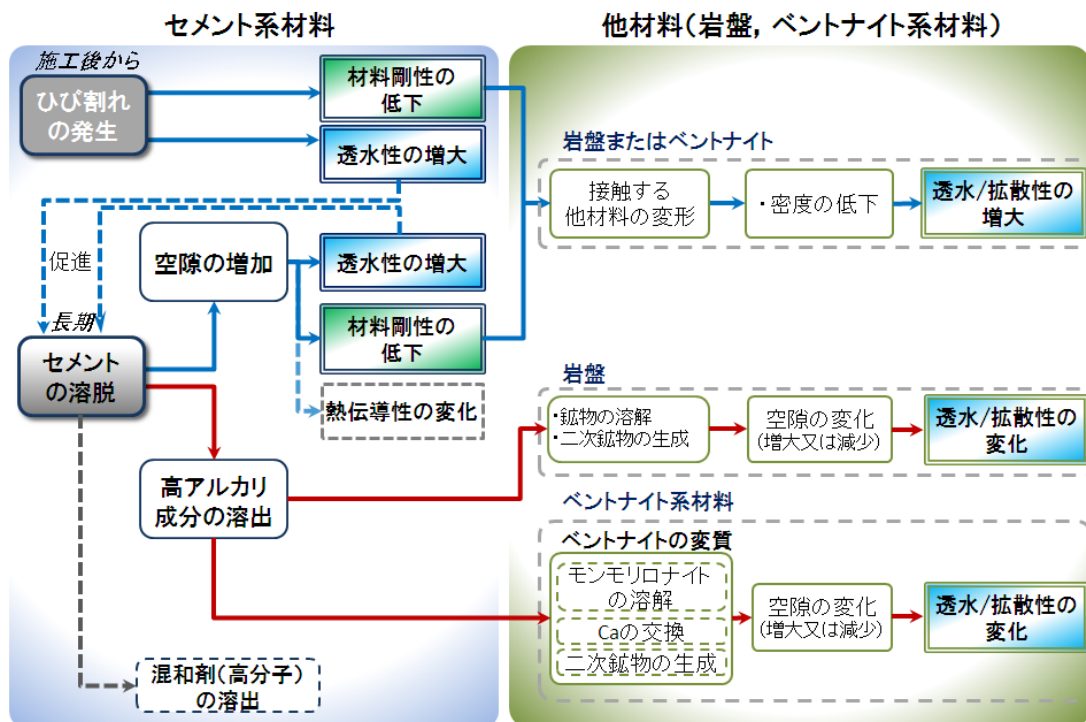


図 2.4-28 セメント系材料の変質により生起する事象の因果関係



(1) ひび割れの発生を起因とする関連事象

図 2.4-28 に示した因果関係図から、ひび割れの発生を起因として生起する関連事象のみを抽出し図 2.4-29 に示す。

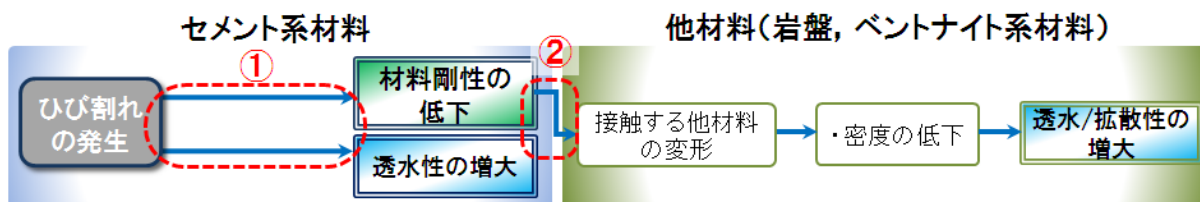


図 2.4-29 ひび割れの発生を起因とする関連事象

対策の検討は、図 2.4-29 に示した①および②の各因果関係に着目し、それぞれについて、原因となる事象について対策を施し、結果となる事象が発生する場合に、その程度を低減するという方針に基づき実施した。以下に、①、②の各因果関係における特性変化低減策の導出の考え方を示す。

- ・ ①の「ひび割れの発生」に起因する「材料剛性の低下」または「透水性の増大」については、セメント系材料に関しては、ひび割れを全く発生させないことは困難と考え、「ひび割れ発生抑制」を特性変化低減策とした。
- ・ ②の「材料剛性の低下」に起因する「接触する他材料の変形」については、ひび割れによる剛性の低下を考慮に入れて、予め剛性の裕度を確保しておくことを特性変化低減策とした。

以上の検討結果を表 2.4-3 にまとめる。

表 2.4-3 ひび割れの発生を起因とする特性変化低減策

図中の番号	原因	結果	特性変化低減策
①	ひび割れの発生	材料剛性の低下	■ひび割れ発生抑制
①	ひび割れの発生	透水性の増大	■ひび割れ発生抑制
②	材料剛性の低下	接触する他材料の変形	■セメント系材料の剛性の裕度の確保

(2) セメントの溶脱に伴う事象を起因とする関連事象

1) セメントの溶脱に伴う空隙の増加を起因とする関連事象

図 2.4-28 に示した因果関係図から、セメントの溶脱に伴う空隙の増加を起因とする関連事象のみを抽出し図 2.4-30 に示す。



図 2.4-30 セメントの溶脱に伴う空隙の増加を起因とする関連事象

以下に、①から③の各因果関係における対策の導出の考え方を示す。

- ・ ①の「セメントの溶脱」に起因する「空隙の増加」については、セメント系材料に関しては、「溶脱の抑制」を特性変化低減策とした。
- ・ ②の「空隙の増加」に起因する「透水性の増大」または「材料剛性の低下」については、空隙がより少ない材料設計を行うことで、影響の程度がより低減できると考え、「空隙率を低下させる材料設計」を特性変化低減策とした。
- ・ ③の「材料剛性の低下」に起因する「接触する他材料の変形」については、予め材料の剛性を高めておくことを対策とした。また、変形可能量を低減するという観点から、部材厚の低減を特性変化低減策とした。

以上の検討結果を表 2.4-4 にまとめる。

表 2.4-4 セメントの溶脱に伴う空隙の増加を起因とする事象についての対策

図中の番号	原因	結果	特性変化低減策
①	セメントの溶脱	空隙の増加	■溶脱の抑制
②	空隙の増加	透水性の増大	■空隙率を低下させる材料設計
②	空隙の増加	材料剛性の低下	■空隙率を低下させる材料設計
③	材料剛性の低下	接触する他材料の変形	■非金属製補強繊維の添加 ■セメント系材料の剛性の裕度の確保 ■部材厚の低減



## 2) セメントの溶脱に伴う高アルカリ成分の溶出を起因とする関連事象

図 2.4-28 に示した因果関係図から、セメントの溶脱に伴う高アルカリ成分の溶出を起因とする関連事象のみを抽出し図 2.4-31 に示す。

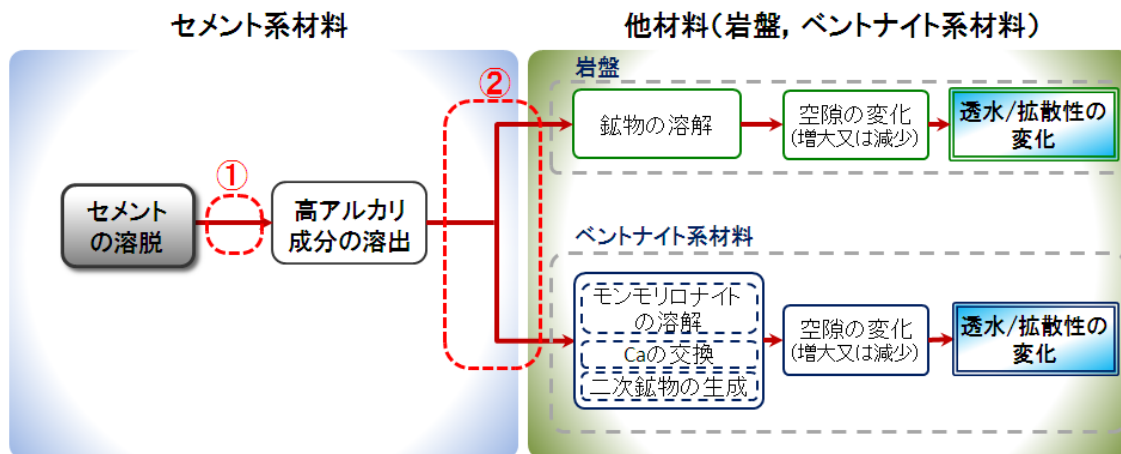


図 2.4-31 セメントの溶脱に伴う高アルカリ成分の溶出を起因とする関連事象

以下に、①および②の各因果関係における対策の導出の考え方を示す。

- ・ ①の「セメントの溶脱」に起因する「高アルカリ成分の溶脱」については、セメント系材料に関しては、溶脱の生起を回避することは困難と考え、「溶脱の抑制」を特性変化低減策とした。
- ・ ②の「高アルカリ成分の溶出」に起因する「鉱物の溶解」または「ベントナイトの変質」については、アルカリ成分の含有量の少ない材料を選択することで、特性変化の程度を低減することができると考え、「アルカリ成分含有量の低減」を特性変化低減策とした。

以上の検討結果を表 2.4-5 にまとめる。

表 2.4-5 セメントの溶脱に伴う高アルカリ成分の溶出を起因とする事象についての対策

図中の番号	原因	結果	対策
①	セメントの溶脱	高アルカリ成分の溶出	■溶脱の抑制
②	高アルカリ成分の溶出	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 鉱物の溶解</li> <li>・ ベントナイトの変質</li> </ul>	■アルカリ成分含有量の低減

## 2.4.4 特性変化低減策実現のためにセメント系材料適用部位に要求される特性

2.4.3 において導出した、特性変化低減策をまとめると以下ようになる。

- ・ ひび割れ発生抑制
- ・ 剛性の裕度確保
- ・ 溶脱抑制
- ・ 空隙率を低下させる材料設計
- ・ 部材厚の低減
- ・ アルカリ成分含有量の低減

以降において、それぞれの低減策を実現させるために必要なセメント適用部位の要求特性を検討する。

### (1) ひび割れ発生抑制

セメント系材料に発生するひび割れは、施工後の硬化の段階に発生する初期ひび割れと、硬化後の化学的な反応により発生するひび割れとに分類される。

前者の初期ひび割れとして、自己収縮に伴うひび割れ、セメントの水和に起因する温度ひび割れ、沈下ひび割れ、プラスチック収縮ひび割れが挙げられる（土木学会，2007）。しかし、沈下ひび割れとプラスチック収縮ひび割れは、施工時に適切な対策を施すことで防ぐことが可能であるから、設計においては一般にその照査を省略してもよいとされる（土木学会，2007）。このことから、本検討においては、初期ひび割れとして、自己収縮に伴うひび割れとセメントの水和に起因する温度ひび割れを対象とすることとした。自己収縮に伴うひび割れ発生抑制を実現させるために必要な特性として、「低収縮性」を挙げた。また、セメントの水和に起因する温度ひび割れについては、「低発熱性」を要求特性とした。ただし、「低発熱性」については、構造物の形状・寸法や環境条件を考慮に入れ、対応の要否を判断する必要があることに留意が必要である。

後者の硬化後の化学的な反応により発生するひび割れとして、アルカリ骨材反応によるもの（川村，1984）や硫酸イオンの供給によるエトリンタイトの生成によるものが挙げられる（松下，1985）。これらのことから、要求特性として、「耐アルカリ骨材反応性」と「化学抵抗性」を設定した。

### (2) 剛性の裕度確保

コンクリート剛性の裕度確保を実現する為の要求特性として、「高強度」を設定した。

### (3) 溶脱の抑制

セメント水和物相中の空隙は、エントラップトエア、エントレインドエア、毛細管空隙、ゲル空隙に大別できるが、これらのうち、ゲル空隙中での Ca イオンの移動速度は毛細管空隙の場合の 1/100~1/1000 と極めて小さい (Buil et al., 1992)。このことから、毛細管空隙以上の孔径となる空隙の量が小さいほど Ca イオンの移動量が少なくなり、緻密であるほど溶脱耐久性を高められるものと考えられる。そこで、溶脱の抑制を実現するための要求特性として「高緻密性」を設定した。

また、セメント中の可溶性 Ca 濃度は、CSH 相の Ca/Si 比が 0.5~2.0 の間で変化した場合に Ca/Si 比の低下とともに低下するという傾向があり (杉山ほか, 2001)、Ca/Si 比の CSH 相は、Ca に関して低溶解度の水和物相であるということが出来る。このことから、溶脱の抑制を実現するための要求特性として「低溶解度の水和物相」を設定した。

### (4) 空隙率を低下させる材料設計

空隙率を低下させる材料設計を実現させるためには、緻密であることが必要と考えられ、「高緻密性」を要求特性とした。

### (5) 部材厚の低減

同一の荷重条件で部材厚を小さくする場合、部材の断面力が増加するので、部材はより高強度であることが要求される。このことから、部材厚の低減を実現させるための要求特性を、「高強度」と設定した。

### (6) アルカリ成分含有量の低減

アルカリ成分含有量の低減を実現する為の要求特性として、「低アルカリ含有量」を設定した。

以上の検討結果を表 2.4-6 に整理する。

表 2.4-6 特性変化低減策を実現する為の要求特性

特性変化低減策	低減策実現の為の要求特性
ひび割れ発生の抑制	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 低収縮性</li> <li>・ 低発熱性（構造物の形状・寸法および環境条件を考慮し、可否を判断）</li> <li>・ 耐アルカリ骨材反応性</li> <li>・ 化学抵抗性</li> </ul>
剛性の裕度確保	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高強度</li> </ul>
溶脱の抑制	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高緻密性</li> <li>・ 低溶解度の水和物相</li> </ul>
空隙を低下させる材料設計	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高緻密性</li> </ul>
部材厚の低減	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高強度</li> </ul>
アルカリ分量の低減	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 低アルカリ含有量</li> </ul>

## 2.5 処分システムの安全機能への影響を低減させるための各部位の要求特性の導出

本節では、処分坑道におけるセメント適用部位について、前述で整理したセメント系材料の変質に起因して生起する諸現象を関連付けることで処分システムの安全機能への影響をその要因となる事象とともに抽出する。さらに、2.4.4で整理した特性変化低減策とその実現のために要求される特性を影響要因に応じて適用し、処分システムの安全機能への影響を低減させるためのセメント適用部位への要求特性を整理する。なお、ここでは、高レベル放射性廃棄物の処分孔堅置き方式の処分坑道（図 2.2-2）を対象とした。

### 2.5.1 処分システムの安全機能への影響の抽出

ここでは、2.1に示した流れに従い、セメント適用部位ごとに、セメントの変質に起因する処分システムの安全機能への影響を抽出・整理した。表 2.5-1 から表 2.5-6 エラー! 参照元が見つかりません。に部位ごとの整理結果を示す。

表 2.5-1 影響事象の整理結果（支保コンクリート）

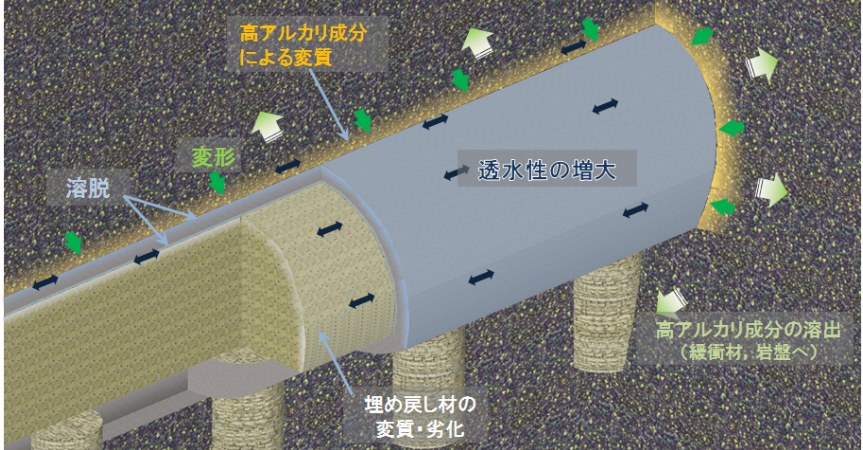
対象部位	支保コンクリート		
要求機能	空洞の力学的安定性確保		
部位の特徴	連続した構造である		
対象部位とその近傍で想定される状態			
各部位で生起する事象	部位	セメント系材料自体の性能の変化（ひび割れ、溶脱）に起因	セメント系材料から溶出される高アルカリ成分に起因
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 顕著なひび割れに起因する剛性の低下（埋め戻し前）</li> <li>・ ひび割れおよび溶脱に起因する透水性の増大</li> </ul>	—
		—	<ul style="list-style-type: none"> <li>①ベントナイトの変質により空隙構造が変化</li> <li>②上記の空隙構造の変化に伴う透水／拡散性が変化（増大又は減少）</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>①溶脱による支保コンクリートの剛性の低下に伴い埋め戻し材が膨潤変形し密度が低下（岩盤から支保コンクリートに作用する荷重よりも埋め戻し材の膨潤圧が大きい場合）</li> <li>②上記の密度低下に伴う透水性の増大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①ベントナイトの変質により空隙構造が変化</li> <li>②上記の空隙構造の変化に伴う透水／拡散性が変化（増大又は減少）</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>①溶脱による支保コンクリートの剛性の低下に伴い止水プラグが膨潤変形し密度が低下（岩盤から支保コンクリートに作用する荷重よりも止水プラグの膨潤圧が大きい場合）</li> <li>②上記の密度低下に伴う透水性の増大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①ベントナイトの変質により空隙構造が変化</li> <li>②上記の空隙構造の変化に伴う透水／拡散性が変化（増大又は減少）</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>①溶脱・ひび割れによる支保コンクリートの剛性の低下に伴い岩盤が変形し空隙率が増加（空洞を安定させるために支保コンクリートが不要である場合は除く）</li> <li>②上記の空隙率の増加に伴う透水性の増大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①岩盤の変質により空隙構造が変化</li> <li>②上記の空隙構造の変化に伴う透水／拡散性が変化（増大又は減少）</li> </ul>		
対象部位の特徴に起因して生じる問題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 支保コンクリートの変質に起因する透水／拡散性の増大が連続し物質移行経路を形成</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 対象部位の透水／拡散性の増大が支保工に沿って連続し物質移行経路を形成</li> </ul>
処分システムの安全機能への影響事象の整理（まとめ）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 坑道に沿って連続する移行経路の形成</li> <li>・ 支保コンクリートの剛性の低下に起因する空洞安定性の低下</li> <li>・ 止水プラグの透水性の増大に起因する坑道に沿った移行経路の形成抑制性能の低下</li> <li>・ 緩衝材の透水／拡散性の増大に起因する核種移行抑制性能の低下</li> </ul>		





表 2.5-3 影響事象の整理結果（床版コンクリート）

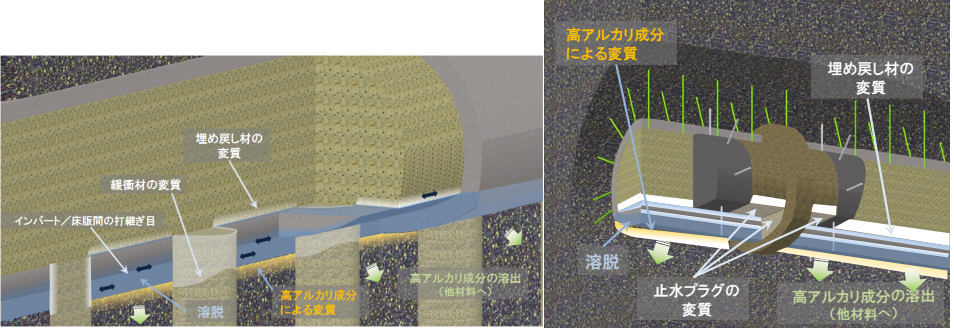
対象部位		床版コンクリート		
要求機能		操業および閉鎖の作業性の確保		
部位の特徴		坑道に沿って連続した構造となる		
対象部位とその近傍で想定される状態				
各部位で生起する事象	部位	セメント系材料自体の性能の変化（ひび割れ、溶脱）に起因	セメント系材料から溶出される高アルカリ成分に起因	
		床版コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> <li>顕著なひび割れに起因する剛性の低下</li> <li>ひび割れおよび溶脱に起因する透水性の増大</li> </ul>	—
		緩衝材	<ul style="list-style-type: none"> <li>①溶脱による床版コンクリートの剛性の低下に伴い緩衝材が膨潤変形し密度が低下</li> <li>②上記の密度低下に伴う透水／拡散性の増大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①ベントナイトの変質により空隙構造が変化</li> <li>②上記の空隙構造の変化に伴う透水／拡散性が変化（増大又は減少）</li> </ul>
		埋め戻し材	<ul style="list-style-type: none"> <li>①溶脱による床版コンクリートの剛性の低下に伴い埋め戻し材が膨潤変形し密度が低下（岩盤から床版コンクリートに作用する荷重よりも埋め戻し材の膨潤圧が大きい場合）</li> <li>②上記の密度低下に伴う透水／拡散性の増大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①ベントナイトの変質により空隙構造が変化</li> <li>②上記の空隙構造の変化に伴う透水／拡散性が変化（増大又は減少）</li> </ul>
		止水プラグ	<ul style="list-style-type: none"> <li>①溶脱による床版コンクリートの剛性の低下に伴い止水プラグが膨潤変形し密度が低下（岩盤から床版コンクリートに作用する荷重よりも止水プラグの膨潤圧が大きい場合）</li> <li>②上記の密度低下に伴う透水／拡散性の増大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①ベントナイトの変質により空隙構造が変化</li> <li>②上記の空隙構造の変化に伴う透水／拡散性が変化（増大又は減少）</li> </ul>
		岩盤	<ul style="list-style-type: none"> <li>①溶脱による床版コンクリートの剛性の低下に伴い岩盤が変形し密度が低下（岩盤から床版コンクリートに作用する荷重のほうが止水プラグまたは埋め戻し材の膨潤圧よりも大きい場合）</li> <li>②上記の密度低下に伴う透水／拡散性の増大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①岩盤の変質により空隙構造が変化</li> <li>②上記の空隙構造の変化に伴う透水／拡散性が変化（増大又は減少）</li> </ul>
対象部位の特徴に起因して生じる問題		<ul style="list-style-type: none"> <li>床版コンクリートの変質に起因する透水性の増大が連続し移行経路を形成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>対象部位の透水／拡散性の増大が床版コンクリートに沿って連続し物質移行経路を形成</li> </ul>	
処分システムの安全機能への影響事象の整理（まとめ）		<ul style="list-style-type: none"> <li>作業性確保の困難</li> <li>坑道に沿って連続する物質移行経路の形成</li> <li>止水プラグの透水性の増大に起因する坑道に沿った移行経路の形成抑制性能の低下</li> <li>緩衝材の透水／拡散性の増大に起因する核種移行抑制性能の低下</li> </ul>		

表 2.5-4 影響事象の整理結果 (強度プラグ)

対象部位	強度プラグ			
要求機能	埋め戻し材の膨出防止, 止水プラグの変形防止			
部位の特徴	マスコンクリートとなる			
対象部位とその近傍で想定される状態	<p>(閉鎖前)</p>		<p>(閉鎖後長期)</p>	
各部位で生起する事象	部位		セメント系材料自体の性能の変化 (ひび割れ, 溶脱) に起因	セメント系材料から溶出される高アルカリ成分に起因
		強度プラグ	・ ひび割れによる剛性の低下 (閉鎖前)	—
		緩衝材	・ なし	①ベントナイトの変質により空隙構造が変化 ②上記の空隙構造の変化に伴う透水/拡散性が変化 (増大又は減少)
		埋め戻し材	①ひび割れまたは溶脱に起因する強度プラグの剛性の低下に伴い埋め戻し材が変形し密度が低下 ②上記の密度低下に伴う透水性の増大	①ベントナイトの変質により空隙構造が変化 ②上記の空隙構造の変化に伴う透水/拡散性が変化 (増大又は減少)
		止水プラグ	①ひび割れまたは溶脱に起因する強度プラグの剛性の低下に伴い止水プラグが膨潤変形し密度が低下 ②上記の密度低下に伴う透水性の増大	①ベントナイトの変質により空隙構造が変化 ②上記の空隙構造の変化に伴う透水/拡散性が変化 (増大又は減少)
	岩盤	①ひび割れまたは溶脱に起因する強度プラグの剛性の低下に伴い岩盤が変形し密度が低下 ②上記の密度低下に伴う透水性の増大	①岩盤の変質により空隙構造が変化 ②上記の空隙構造の変化に伴う透水/拡散性が変化 (増大又は減少)	
対象部位の特徴に起因して生じる問題	①セメント水和熱によりコンクリート内部温度が高くなり, 温度ひび割れの発生確率が高くなる ②部材厚が大きいため, 変質 (溶脱) 厚さが大きくなり, 他材料の変形量が大きくなる可能性がある		③セメント総量が多いため, アルカリ成分の総量が多くなることが想定される	
処分システムの安全機能への影響事象の整理 (まとめ)	・ 止水プラグの透水性の増大に起因する坑道に沿った移行経路の形成抑制性能の低下 ・ 緩衝材の透水/拡散性の増大に起因する核種移行抑制性能の低下 ・ 岩盤の透水性の増大範囲が止水プラグ周辺に到達し, 坑道に沿った移行経路の形成抑制性能が低下 ・ 部位の特徴に起因する上記各影響事象の程度の増大			



表 2.5-5 影響事象の整理結果（グラウト）

対象部位	グラウト			
要求機能	操業期間中の坑道周辺岩盤の透水性の低減			
部位の特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>・グラウトが充填された範囲の特定が困難</li> <li>・亀裂に充填されたグラウトの品質を保証することが困難</li> </ul>			
対象部位とその近傍で想定される状態				
各部位で生起する事象	部位	セメント系材料自体の性能の変化（ひび割れ、溶脱）に起因	セメント系材料から溶出される高アルカリ成分に起因	
		グラウト	<ul style="list-style-type: none"> <li>・溶脱による湧水抑制性能の低下（閉鎖前には有意な影響はないものと想定）</li> </ul>	—
		緩衝材	<ul style="list-style-type: none"> <li>・なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①ベントナイトの変質により空隙構造が変化</li> <li>②上記の空隙構造の変化に伴う透水／拡散性が変化（増大又は減少）</li> </ul>
		埋め戻し材	<ul style="list-style-type: none"> <li>・なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①ベントナイトの変質により空隙構造が変化</li> <li>②上記の空隙構造の変化に伴う透水／拡散性が変化（増大又は減少）</li> </ul>
		止水プラグ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①ベントナイトの変質により空隙構造が変化</li> <li>②上記の空隙構造の変化に伴う透水／拡散性が変化（増大又は減少）</li> </ul>
岩盤	<ul style="list-style-type: none"> <li>・なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①岩盤の変質により空隙構造が変化</li> <li>②上記の空隙構造の変化に伴いグラウト注入箇所周りの透水／拡散性が変化（増大又は減少）</li> </ul>		
対象部位の特徴に起因して生じる問題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高アルカリ成分による影響評価の際の初期状態（ソースターム）の設定が困難</li> </ul>		
処分システムの安全機能への影響事象の整理（まとめ）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・坑道に沿った移行経路の形成抑制性能の低下（起因事象：止水プラグの透水／拡散性の増大，埋め戻し材の透水性の増大）</li> <li>・緩衝材の透水／拡散性の増大に起因する核種移行抑制性能の低下</li> <li>・グラウト注入箇所周りの岩盤の透水／拡散性の増大に起因する核種移行抑制性能の低下（上記の各種の影響の評価においては初期条件の不確か性が大きくなることに留意が必要）</li> </ul>			

表 2.5-6 影響事象の整理結果（ロックボルト定着材）

対象部位		ロックボルト定着材		
要求機能		鋼棒の岩盤への定着		
部位の特徴		<ul style="list-style-type: none"> <li>・坑道に沿って定間隔で配置される</li> <li>・単位長さ当たりの使用量が小さい</li> </ul>		
対象部位とその近傍で想定される状態				
各部位で生起する事象	部位		セメント系材料自体の性能の変化（ひび割れ、溶脱）に起因	セメント系材料から溶出される高アルカリ成分に起因
		ロックボルト定着材	・ なし (埋め戻し前までの期間では有意な影響は生じないと想定)	—
		緩衝材	・ なし	①ベントナイトの変質により空隙構造が変化 ②上記の空隙構造の変化に伴う透水／拡散性が変化（増大又は減少）
		埋め戻し材	・ なし	①ベントナイトの変質により空隙構造が変化 ②上記の空隙構造の変化に伴う透水／拡散性が変化（増大又は減少）
		止水プラグ	・ なし	①ベントナイトの変質により空隙構造が変化 ②上記の空隙構造の変化に伴う透水／拡散性が変化（増大又は減少）
	岩盤	①ひび割れまたは溶脱に起因するロックボルト定着材の剛性の低下に伴い岩盤が変形し密度が低下 ②上記の密度低下に伴うロックボルト孔周りの透水性の増大	①岩盤の変質により空隙構造が変化 ②上記の空隙構造の変化に伴いロックボルト孔周りの透水／拡散性が変化（増大又は減少）	
対象部位の特徴に起因して生じる問題		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ロックボルト孔周りの透水性が増大する範囲が連結する場合、坑道に沿って連続する岩盤中の移行経路が形成（本部位の特徴を考慮に入れた影響評価に基づいて判断）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ロックボルト孔周りの透水性が増大する範囲が連結する場合、坑道に沿って連続する岩盤中の移行経路が形成（本部位の特徴を考慮に入れた影響評価に基づいて判断）</li> <li>・ 埋め戻し材の透水性の増大が連続し移行経路を形成</li> </ul>	
処分システムの安全機能への影響事象の整理（まとめ）		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 坑道に沿った移行経路の形成抑制性能の低下（起回事象：止水プラグの透水性の増大，埋め戻し材の透水性の増加範囲の連続，ロックボルト孔周りの透水性の増加範囲の連続）</li> <li>・ 緩衝材の透水／拡散性の増大に起因する核種移行抑制性能の低下</li> </ul>		

### 2.5.2 処分システムの影響を低減させるための各部位の要求特性の整理

ここでは、前項で整理した処分システムの安全機能への影響事象について、2.4.3 および 2.4.4 で整理した影響要因に応じた対策とその実現のための要求特性を各部位に適用し、表 2.5-7 から表 2.5-15 に整理する。

表 2.5-7 各部位の要求特性の整理結果（支保コンクリート）

対象部位：支保コンクリート（1 / 2）

抽出された影響事象	影響要因			対 策	セメント系材料への要求特性
	要因 1	要因 2	要因 3		
坑道に沿って連続する移行経路の形成	ひび割れの発生	・透水性の増大	—	■ひび割れ発生の抑制	・低収縮性，低発熱性 <sup>※1</sup> ，耐アルカリ骨材反応性，化学抵抗性
		・材料剛性の低下	—	■ひび割れ発生の抑制 ■材料の剛性の裕度の確保	・低収縮性，低発熱性 <sup>※1</sup> ，耐アルカリ骨材反応性，化学抵抗性 ・高強度
	・セメントの溶脱	・空隙の増加	・透水性の増大	■溶脱の抑制 ■空隙率を低下させる材料設計	・高緻密性，低溶解度の水和物相
			・材料剛性の低下	■溶脱の抑制 ■空隙率を低下させる材料設計 ■材料の剛性の裕度の確保 ■部材厚の低減	・高緻密性，低溶解度の水和物相 ・高強度
	・高アルカリ成分の溶出	—	■溶脱の抑制 ■アルカリ含有量の低減	・高緻密性，低溶解度の水和物相 ・低アルカリ含有量	
空洞安定性の低下	ひび割れの発生	・材料剛性の低下	—	■ひび割れ発生の抑制 ■材料の剛性の裕度の確保	・低発熱性 <sup>※1</sup> ，低収縮性，耐アルカリ骨材反応性，化学抵抗性 ・高強度
坑道に沿った物質移行経路の形成抑制性能の低下（止水プラグの機能低下）	セメントの溶脱	・空隙の増加	・材料剛性の低下	■溶脱の抑制 ■空隙率を低下させる材料設計 ■材料の剛性の裕度の確保 ■部材厚の低減	・高緻密性，低溶解度の水和物相 ・高強度
		・高アルカリ成分の溶出	—	■溶脱の抑制 ■アルカリ含有量の低減	・高緻密性，低溶解度の水和物相 ・低アルカリ含有量 <sup>※2</sup>

※1 温度ひび割れの発生は部材の厚さに依存するため，低発熱性が必須の対策とはならないことに留意が必要。

※2 アルカリ影響評価により不要となる場合がある。

表 2.5-8 各部位の要求特性の整理結果（支保コンクリート）

対象部位：支保コンクリート（2 / 2）

抽出された影響事象	影響要因			対 策	セメント系材料への 要求特性
	要因 1	要因 2	要因 3		
緩衝材の核種移行抑制 性能の低下	・セメントの溶脱	・高アルカリ成分 の溶出	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>■溶脱の抑制</li> <li>■アルカリ含有量の低減<sup>※1</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高緻密性，低溶解度の水和物相</li> <li>・低アルカリ含有量</li> </ul>

※1 アルカリ影響評価により不要となる場合がある。

表 2.5-9 各部位の要求特性の整理結果（インバートコンクリート）

対象部位：インバートコンクリート（1 / 2）

抽出された影響事象	影響要因			対 策	セメント系材料への 要求特性
	要因 1	要因 2	要因 3		
坑道に沿って連続する 移行経路の形成	ひび割れの発生	透水性の増大	—	■ひび割れ発生の抑制	・低発熱性※1，低収縮性，耐アルカリ骨材反応性，化学抵抗性
		材料剛性の低下	—	■ひび割れ発生の抑制 ■材料の剛性の裕度の確保	・低発熱性※1，低収縮性，耐アルカリ骨材反応性，化学抵抗性 ・高強度
	セメントの溶脱	空隙の増加	透水性の増大	■溶脱の抑制 ■空隙率を低下させる材料設計	・高緻密性，低溶解度の水和物相
			材料剛性の低下	■溶脱の抑制 ■空隙率を低下させる材料設計 ■材料の剛性の裕度の確保 ■部材厚の低減	・高緻密性，低溶解度の水和物相 ・高強度
		高アルカリ成分の溶出	—	■溶脱の抑制 ■アルカリ含有量の低減	・高緻密性，低溶解度の水和物相 ・低アルカリ含有量※2
坑道の力学的安定性の低下	ひび割れの発生	材料剛性の低下	—	■ひび割れ発生の抑制 ■材料の剛性の裕度の確保	・低発熱性※1，低収縮性，耐アルカリ骨材反応性，化学抵抗性 ・高強度
止水プラグの透水性の増大	セメントの溶脱	空隙の増加	材料剛性の低下	■溶脱の抑制 ■空隙率を低下させる材料設計 ■材料の剛性の裕度の確保 ■部材厚の低減	・高緻密性，低溶解度の水和物相，化学抵抗性 ・高強度
		高アルカリ成分の溶出	—	■溶脱の抑制 ■アルカリ含有量の低減	・高緻密性，低溶解度の水和物相，化学抵抗性 ・低アルカリ含有量※2

※1 温度ひび割れの発生は部材の厚さに依存するため，低発熱性が必須の対策とはならないことに留意が必要。

※2 アルカリ影響評価により不要となる場合がある。

表 2.5-10 各部位の要求特性の整理結果（インバートコンクリート）

対象部位：インバートコンクリート（2 / 2）

抽出された影響事象	影響要因			対 策	セメント系材料への 要求特性
	要因 1	要因 2	要因 3		
緩衝材の核種移行抑制性能の低下	・セメントの溶脱	・高アルカリ成分の溶出	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>■溶脱の抑制</li> <li>■アルカリ含有量の低減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高緻密性，低溶解度の水和物相</li> <li>・低アルカリ含有量<sup>※1</sup></li> </ul>

※1 アルカリ影響評価により不要となる場合がある。

表 2.5-11 各部位の要求特性の整理結果（床版コンクリート）

対象部位：床版コンクリート（1 / 2）

抽出された影響事象	影響要因			対 策	セメント系材料への 要求特性
	要因 1	要因 2	要因 3		
坑道に沿って連続する 移行経路の形成	ひび割れの発生	透水性の増大	—	■ひび割れ発生の抑制	・低発熱性※1，低収縮性，耐アルカリ骨材反応性，化学抵抗性
		材料剛性の低下	—	■ひび割れ発生の抑制 ■材料の剛性の裕度の確保	・低発熱性※1，低収縮性，耐アルカリ骨材反応性，化学抵抗性 ・高強度
	セメントの溶脱	空隙の増加	透水性の増大	■溶脱の抑制 ■空隙率を低下させる材料設計	・高緻密性，低溶解度の水和物相
			材料剛性の低下	■溶脱の抑制 ■空隙率を低下させる材料設計 ■材料の剛性の裕度の確保 ■部材厚の低減	・高緻密性，低溶解度の水和物相 ・高強度
	高アルカリ成分の溶出	—	■溶脱の抑制 ■アルカリ含有量の低減	・高緻密性，低溶解度の水和物相 ・低アルカリ含有量※2	
作業性確保の困難	ひび割れの発生	材料剛性の低下	—	■ひび割れ発生の抑制 ■材料の剛性の裕度の確保	・低発熱性※1 ・高強度
止水プラグの透水性の 増大	セメントの溶脱	空隙の増加	材料剛性の低下	■溶脱の抑制 ■空隙率を低下させる材料設計 ■材料の剛性の裕度の確保 ■部材厚の低減	・高緻密性，低溶解度の水和物相，化学抵抗性 ・高強度
		高アルカリ成分の溶出	—	■溶脱の抑制 ■アルカリ含有量の低減	・高緻密性，低溶解度の水和物相，化学抵抗性 ・低アルカリ含有量※2

※1 温度ひび割れの発生は部材の厚さに依存するため，低発熱性が必須の対策とはならないことに留意が必要。

※2 アルカリ影響評価により不要となる場合。



表 2.5-12 各部位の要求特性の整理結果（床版コンクリート）

対象部位：床版コンクリート（2 / 2）

抽出された影響事象	影響要因			対 策	セメント系材料への 要求特性
	要因 1	要因 2	要因 3		
緩衝材の核種移行抑制 性能の低下	・セメントの溶脱	・高アルカリ成分 の溶出	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>■溶脱の抑制</li> <li>■アルカリ含有量の低減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高緻密性, 低溶解度の水和物相, 化学抵抗性</li> <li>・低アルカリ含有量<sup>※1</sup></li> </ul>

※1 アルカリ影響評価により不要となる場合がある。

表 2.5-13 各部位の要求特性の整理結果（強度プラグ）

対象部位：強度プラグ

抽出された影響事象	影響要因			対 策	セメント系材料への 要求特性
	要因 1	要因 2	要因 3		
強度プラグの力学的安定性の低下	・ ひび割れの発生	・ 材料剛性の低下	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ ひび割れ発生の抑制</li> <li>■ 材料の剛性の裕度の確保</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 低発熱性，低収縮性，耐アルカリ骨材反応性，化学抵抗性</li> <li>・ 高強度</li> </ul>
止水プラグの透水性の増大に起因する坑道に沿った移行経路の形成抑制性能の低下	・ ひび割れの発生	・ 材料剛性の低下	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ ひび割れ発生の抑制</li> <li>■ 材料の剛性の裕度の確保</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 低発熱性，低収縮性，耐アルカリ骨材反応性，化学抵抗性</li> <li>・ 高強度</li> </ul>
	・ セメントの溶脱	・ 空隙の増加	・ 材料剛性の低下	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 溶脱の抑制</li> <li>■ 空隙率を低下させる材料設計</li> <li>■ 材料の剛性の裕度の確保</li> <li>■ 部材厚の低減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高緻密性，低溶解度の水和物相</li> <li>・ 高強度</li> </ul>
		・ 高アルカリ成分の溶出	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 溶脱の抑制</li> <li>■ アルカリ含有量の低減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高緻密性，低溶解度の水和物相</li> <li>・ 低アルカリ含有量<sup>※1</sup></li> </ul>
緩衝材および岩盤の核種移行抑制性能の低下	・ セメントの溶脱	・ 高アルカリ成分の溶出	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 溶脱の抑制</li> <li>■ アルカリ含有量の低減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高緻密性，低溶解度の水和物相</li> <li>・ 低アルカリ含有量<sup>※1</sup></li> </ul>
岩盤の透水性の増大	・ セメントの溶脱	・ 高アルカリ成分の溶出	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 溶脱の抑制</li> <li>■ アルカリ含有量の低減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高緻密性，低溶解度の水和物相</li> <li>・ 低アルカリ含有量<sup>※1</sup></li> </ul>

※1 アルカリ影響評価により不要となる場合がある。

表 2.5-14 各部位の設計要件の整理（グラウト）

対象部位：グラウト

抽出された影響事象	影響要因			対 策	セメント系材料への 要求特性
	要因 1	要因 2	要因 3		
止水プラグおよび埋め戻し材の透水性の増大	・セメントの溶脱※1	・高アルカリ成分の溶出	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>■溶脱の抑制</li> <li>■アルカリ含有量の低減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低溶解度の水和物相</li> <li>・低アルカリ含有量※2</li> </ul>
緩衝材の核種移行抑制性能の低下					
岩盤の透水性の増大					

※1 セメントの溶脱に対する対策については、充填されたグラウトの品質の保証が困難であることから、「高緻密性」による対策はなしとした。

※2 アルカリ影響評価により不要となる場合がある。

58

表 2.5-15 各部位の要求特性の整理結果（ロックボルト定着材）

対象部位：ロックボルト定着材

抽出された影響事象	影響要因			対 策	セメント系材料への 要求特性
	要因 1	要因 2	要因 3		
止水プラグおよび埋め戻し材の透水性の増大	・セメントの溶脱	・高アルカリ成分の溶出	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>■溶脱の抑制</li> <li>■アルカリ含有量の低減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高緻密性，低溶解度の水和物相</li> <li>・低アルカリ含有量※1</li> </ul>
坑道に沿って連続する移行経路の形成					
緩衝材の核種移行抑制性能の低下					

※1 アルカリ影響評価により不要となる場合がある。

以上の整理から，処分システムへの影響を低減させるための各部位の要求特性を表 2.5-16 にまとめる。

表 2.5-16 処分システムへの影響を低減させるための要求特性

部位	要求特性
支保コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 低収縮性</li> <li>・ 低発熱性<sup>※1</sup></li> </ul>
インバートコンクリート	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 耐アルカリ骨材反応性</li> </ul>
床版コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 化学抵抗性</li> <li>・ 高強度</li> </ul>
強度プラグ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 低収縮性</li> <li>・ 耐アルカリ骨材反応性</li> <li>・ 化学抵抗性</li> <li>・ 高強度</li> </ul>
グラウト	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 低溶解度の水和物相</li> <li>・ 低アルカリ含有量<sup>※2</sup></li> </ul>
ロックボルト定着材	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高緻密性</li> <li>・ 低溶解度の水和物相</li> <li>・ 低アルカリ含有量<sup>※2</sup></li> </ul>

※1 温度ひび割れの発生は部材の厚さに依存するため，低発熱性が必須の対策とはならないことに留意が必要。

※2 アルカリ影響評価により不要となる場合がある。

## 2.6 2章のまとめ

本章では，地下施設を構成する各部位の要求機能を整理した上で，これらの要求機能を充足させるための要求特性を整理した。また，セメント適用部位ごとに各々十分に劣化が進んだ状態を想定し，セメントの劣化が，処分システムに与える影響を検討した。さらに，それらの影響を低減するための方策を検討することにより，各部位に適用されるセメント系材料に求められる要求特性を導出・整理した。表 2.6-1 にセメント適用部位ごとに要求機能ならびにこれらの要求特性を示す。

本章の検討においては，各部位のセメント系材料の劣化が十分進んだ状態を分析し，要求特性を導出している。

各部位で生起する影響事象を分析し，影響の低減という観点から要求特性を導出した。しかし，部位間の位置関係，すなわち着目した部位から離れた部位への間接的な影響，および劣化の順序を考慮しておらず，各部位で独立した検討の実施に留まる。このため，人工バリアを含む地下施設と天然バリアとなる母岩を併せた全体系として，安全機能の確保という観点で着目すべき部位，ならびに長期に亘りその影響を考慮すべき部位の把握，すなわち，各部位間における相対的な重要度の把握は不可欠である。各部位の相対的な重要

度を把握し、重要な部位に関する課題について優先的に対応することは、今後、セメント系材料の合理的な技術開発を展開する為に不可欠であると考えます。そこで、次章ではセメント影響によるシステム全体の状態の変遷を検討することにより、各部位の相対的な重要度を把握することを試みます。

表 2.6-1 セメント適用部位の要求機能と要求特性のまとめ

セメント適用部位	埋戻し前における要求機能とそれを満足させるための要求特性		処分システムの安全機能への影響を低減させるための要求特性
	要求機能	要求特性	
支保コンクリート	・ 空洞安定性の確保	・ 所定の強度特性 ・ 混和剤との適合性 ・ 圧送可能な流動性	・ 低収縮性 ・ 低発熱性※1 ・ 耐アルカリ骨材反応性 ・ 化学抵抗性 ・ 高強度 ・ 高緻密性 ・ 低溶解度の水和物相 ・ 低アルカリ含有量※2
インバートコンクリート	・ 空洞安定性の確保	・ 所定の強度特性 ・ 混和剤との適合性 ・ 圧送可能な流動性	・ 化学抵抗性 ・ 高強度
床版コンクリート	・ 操業および閉鎖の作業性の確保	・ 所定の強度特性 ・ 混和剤との適合性 ・ 圧送および充填可能な流動性	
強度プラグ	・ 埋戻し材の膨出防止 ・ 止水プラグの変形防止	・ 所定の強度特性 ・ 混和剤との適合性 ・ 圧送および充填可能な流動性	・ 低発熱性 ・ 低収縮性 ・ 耐アルカリ骨材反応性 ・ 化学抵抗性 ・ 高強度 ・ 高緻密性 ・ 低溶解度の水和物相 ・ 低アルカリ含有量※2
グラウト	・ 湧水の抑制	・ 所定の強度特性 ・ 混和剤との適合性 ・ 対象亀裂への浸透性 ・ 圧送可能な流動性	・ 低溶解度の水和物相 ・ 低アルカリ含有量※2
ロックボルト定着材	・ 鋼棒の岩盤への速やかな定着	・ 所定の強度特性 ・ 混和剤との適合性 ・ 圧送可能な流動性	・ 高緻密性 ・ 低溶解度の水和物相 ・ 低アルカリ含有量※2

※1 温度ひび割れの発生は部材の厚さに依存するため、低発熱性が必須の対策とはならないことに留意が必要。

※2 アルカリ影響評価により不要となる場合がある。

## 第2章 参考文献

- Anderson, M., Holgersson, S., Ervanne, H., Glaus, M. A., Wieland, E., Karttunen, P., Laine, H., Snellman, M., Lothenbach, B., Puigdomenech, I., Schwyn, B., Ueda, H., Vuorio, M. and Yamamoto, T. (2008): Development of methodology for evaluation of long-term safety aspects of organic cement paste components, POSIVA Working report 2008-28.
- Bauer, A. and Berger, G. (1998): Kaolinite and smectite dissolution rate in high molar KOH solution at 35° and 80°C, Applied Geochemistry, Vol.13, pp.905-916.
- Berner, U. (2004): Status of cement modeling – Future investigations in the view of cement/bentonite interactions, NUMO-TR-04-05, pp.A3·102- A3·106.
- Buil, M., Cliver, J., Revertegat, E.(1992) : A model of the attack of pure water or undersaturated lime solutions on cement, ASTM STP 1123, 227-241.
- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 (2005) : TRU 廃棄物処分技術検討書ー第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめー.
- 土木学会 (2003) : コンクリートの化学的浸食・溶脱に関する研究の現状, コンクリート技術シリーズ No.53.
- 土木学会 (2006) : 「2006年制定」トンネル標準示方書[山岳工法]・同解説.
- 土木学会 (2007) : 2007年制定 コンクリート標準示方書[設計編].
- 土木学会エネルギー委員会 (2009) : 余裕深度処分における地下施設の設計品質管理および検査の考え方.
- Gaboreau, S., Pret, D., Tinsseau, E., Claret, F., Pellegrini, D. and Stammose, D. (2011): 15 years of in situ cement-argillite interaction from Tournemire URL - Characterisation of the multi-scale spatial heterogeneities of pore space evolution, Applied Geochemistry, Vol.26, pp.2159-2171.
- 原子力発電環境整備機構 (2009) : 処分場の概要ー放射性廃棄物の地層処分事業について, 分冊ー1.
- 櫛原弘貴, 武若耕司, 山口明伸, 白澤直 (2009) : ケイ酸塩系表面含浸材を用いたひび割れ補修による止水効果に関する検討, コンクリート工学年次論文集, vol. 31, No. 1, pp.1933-1938.
- Huertas, F.J., Caballero, E., de Cisneros, C.J., Huertas, F. and Linares, J. (2001): Kinetics of montmorillonite dissolution in granitic solutions, Applied Geochemistry, Vol.16, pp.397-407.



- 川村満紀, 榑場重正 (1984) : アルカリシリカ反応とその防止対策, 土木学会論文集 No.348 /V-1, 13-26.
- 近藤連一, 大門正機, 岡林茂生 (1971) : セメントの粒度分布がモルタル硬化体の細孔径分布と強度に及ぼす影響, セメント技術年報 XXV, pp.82-87.
- Lagerblad, B. (2001): Leaching performance of concrete based on studies of samples from old concrete constructions, SKB TR-01-27.
- 松下博通, 牧角龍憲, 浜田秀則 (1985) : 硫酸塩によるコンクリートの劣化に関する基礎的研究, 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, 65-68.
- 日本コンクリート工学協会 (2009) : コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2009-.
- 小田治恵, 佐々木良一, David Savage, Randolph C. Arthur, 本田明. (2005) : 緩衝材の鉱物学的長期変遷シナリオ, JNC TN8400 2005-020.
- POSIVA (2009): R20 Programme: Development of Rock Grouting design, Techniques and Procedures for ONKALO, Working Report 2008-45.
- SKB (2010): Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels, TR-10-16.
- Sato, T., Kuroda, M., Yokoyama, S., Fukushi, K., Tanaka, T. and Nakayama, S. (2003): Mechanism and kinetics of smectite dissolution under alkaline conditions, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol.67, S1 A415.
- Sato, T., Kuroda, M., Yokoyama, S., Tsutsumi, M., Fukushi, K., Tanaka, T. and Nakayama, S. (2004): Dissolution mechanism and kinetics of smectite under alkaline conditions, *Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement* .
- 杉山大輔, 藤田智成, 中西潔 (2001) : TRU 廃棄物処分環境におけるセメント系材料の化学的変質評価 (その1) -カルシウムシリケート水和物の熱力学的溶解沈殿モデルの提案-, 電力中央研究所報告 T01007.
- 寺戸康隆, 中川誠司, 米田俊一, 塩崎功, 大西有三, 中川浩二 (1998) : 亀裂性岩盤におけるグラウト侵入状況のはぎ取り調査, 土木学会論文集 No.589/III-42, 55-66.
- 内田善久, 蓮本清二, 小熊登, 神藤健一 (2006) : ダム基礎グラウチングの完了基準に関する実験的研究, 土木学会論文集 F, Vol.62 NO.3, 531-545.

山本武志, 金津努 (2007) : フライアッシュのポゾラン反応に伴う組織緻密化と強度発現メカニズムの実験的考察. 土木学会論文集 E, Vol.63 No.1, pp.52-56.

山本武志, 廣永道彦 (2008) : フライアッシュ混合使用による溶脱変質フロント進行抑制メカニズムの実験的考察, 土木学会論文集 E, Vol.64 No.1, pp.206-223.

安田和弘, 横関康祐, 河田陽介, 吉澤勇二 (2002) : カルシウム溶出に伴うコンクリートの物理性能および物質移行性能の変化に関する検討, セメント・コンクリート論文集, No.56.

横山信吾, 中村邦彦, 田中幸久, 廣永道彦 (2011) : 放射性廃棄物処分におけるベントナイト系材料のアルカリ溶液による変質挙動 (その2) -アルカリ溶液の種類がベントナイト混合土の透水性に及ぼす影響-, 電力中央研究所報告 N10037.

財団法人 国土開発技術センター (2002) : グラウチング技術指針・同解説.

### 3 処分システムの状態変遷の推定に基づくセメント系材料の課題抽出

#### 3.1 状態変遷の推定の試行

2章では、セメント系材料の変質が十分進んだ状態を各部位ごとに分析し、要求特性を導出した。しかし、この場合、時間の進展や部位相互の位置関係などの考慮がなされておらず、長期の安全性の確保に対して、相対的に重要度の高い部位の特定が出来ない。重要度の高い部位が明確になれば、それに関する課題について優先的に対応出来、その結果として、セメント系材料の効率的な研究／技術開発を展開することが可能となると考えられる。

そこで本章では、2章で示した部材構成を引用して、処分坑道周辺を対象としたシステム全体の状態変遷を推定することで、重要度の高い部位を特定し、その状態変化を把握することを試みる。さらに、セメント系材料を対象とした優先的に取り組むべき検討事項を明らかにする。なお、状態変遷の推定においては、低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分を対象に検討された状態評価の方法（土木学会エネルギー委員会，2008）を参考にした。

##### 3.1.1 検討の前提条件

###### (1) 使用するセメント種類

セメント系材料が用いられる代表的な部位は、2章に示すように①支保コンクリート、②インバートコンクリート、③床版コンクリート、④強度プラグ、⑤グラウト、⑥ロックボルト定着材であり、求められる性能として、2.6でまとめられたように高強度、低発熱性（ひび割れ抑制）、高緻密性、低アルカリ性、さらに施工性の観点から強度発現速度が挙げられるが、各部位で各性能の要求順位が異なる。

本報告書における状態変遷の試行は、サイト特有の具体的条件を設定して定量的に実施するものではなく、セメント系材料の要求特性の設定の方法論の検討を目的としている。このため、幅広い一般的条件で取得されたデータや評価事例が多く整っている材料を想定することが適切である。そこで、グラウト、支保コンクリートなどのトンネル工事で施工実績が豊富であり、処分施設に係る諸耐久性評価試験の基準試料として多く使用されるOPCを全部材で使用することを想定する。なお、例えば「低アルカリ性」という要求性能を重視すれば低アルカリ性セメントの適用が考えられるが、強度特性データや溶脱評価モデルの開発などの点でOPCの場合の方がより知見が充実しているのが現状である。

###### (2) 環境条件

セメント系材料に関する課題をより多く抽出できるよう、セメント使用量が増え、さらに劣化作用が促進される環境条件、そして実験的検討事例で多く適用されてきた条件も考慮して環境条件を想定することとした。

第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機

構, 2005) に示される環境条件のうち, 本検討の目的に沿う条件として, 表 3.1-1 の条件を想定した。ベントナイト系材料および母岩に対するアルカリ影響の長期評価解析において設定される環境条件として降水系地下水が用いられる検討例が多いため, 本検討における長期変遷過程の推定には, 引用し易い降水系地下水を想定した (表 3.1-1)。

表 3.1-1 状態変遷の試行に用いたパラメータ

設定項目		設定条件
天然バリア	岩質	堆積岩
	実効拡散係数	$1.2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
	透水係数	$1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$
	動水勾配	0.01
地下水の水質		降水系 (淡水)
処分深度		500 m
初期地温		30°C

(3) 対象とする地下施設の条件設定

表 3.1-2 に地下施設の各部材の条件設定を示す。

表 3.1-2 各部材の条件設定

部位		設定内容
処分坑道仕様		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 処分孔竖置き方式</li> <li>・ 第2次取りまとめ堆積岩ケースに準ずる</li> </ul>
支保工	支保コンクリート インバートコンクリート	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 吹付コンクリート (t = 500 mm)</li> <li>・ 設計基準強度 <math>f'_{ck} = 40</math> MPa</li> <li>・ 弾性係数 40,000 MPa</li> <li>・ 初期空隙率 : 0.13</li> </ul>
	ロックボルト	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ L = 3.0 m (異形棒鋼 D22, 削孔径 42 mm)</li> <li>・ 11 本/断面</li> <li>・ 坑道延長方向に 1.5 m ごとに設置</li> </ul>
埋戻し材		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 透水係数が母岩と同程度</li> <li>・ ベントナイト・掘削ズリ混合材 (掘削ズリ混合率 85w%)</li> <li>・ 乾燥密度 : 1.80 Mg / m<sup>3</sup></li> <li>・ 有効粘土密度 : 0.64 Mg / m<sup>3</sup> (膨潤圧は 0.2 MPa 未満と想定)</li> </ul>
強度プラグ		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 無筋コンクリート</li> <li>・ 設計基準強度 <math>f'_{ck} = 40</math> MPa</li> <li>・ 弾性係数 40,000 MPa</li> </ul>
止水プラグ		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ベントナイト・ケイ砂混合土 (ケイ砂混合率 30%)</li> <li>・ 乾燥密度 : 1.90 Mg / m<sup>3</sup></li> <li>・ 最大膨潤圧 : 1.0 MPa</li> <li>・ 透水係数 : <math>1 \times 10^{-11}</math> m/s 以下</li> </ul>
グラウト		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 超微粒子セメント (<math>\rho = 3.0</math> Mg / m<sup>3</sup>)</li> <li>・ 亀裂に充填された状態で、水セメント比が 0.4 にまで脱水と想定</li> </ul>
緩衝材		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 形状および寸法 : 第2次取りまとめに準ずる</li> <li>・ 材質 : ベントナイト・ケイ砂混合土 (混合比 (重量比) : ベントナイト : ケイ砂 = 7 : 3, <math>\rho_d = 1.6</math> Mg / m<sup>3</sup>, 間隙率=0.40)</li> <li>・ 透水係数 : <math>1 \times 10^{-11}</math> m/s 以下</li> </ul>
オーバーパック		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 材質 : 炭素鋼</li> <li>・ 形状および寸法 : 第2次取りまとめに準ずる</li> </ul>

以下に、各部位の条件設定の考え方について記述する。

### ①坑道形状および支保工

坑道および処分孔の形状は、第2次取りまとめ一分冊2（核燃料サイクル開発機構、1999a）の軟岩処分孔縦置きの場合を採用することとした。また、支保工については、アーチ部およびインバート部を吹付けコンクリートとし、その厚さは500 mmとした。ロックボルトは削孔径42 mmの孔に長さ3.0 mのD22の異形棒鋼をモルタルで定着し、1断面あたり11本設置し、坑道延長方向には1.5 m間隔で設置する。図3.1-1に処分孔設置位置における坑道の断面図を示す。処分坑道離間距離と廃棄体ピッチについては第2次取りまとめの軟岩系岩盤の処分孔縦置き方式の仕様を採用した（図3.1-2）。また、適用するコンクリートは設計基準強度を40 MPa、弾性係数を40,000 MPaと設定した。

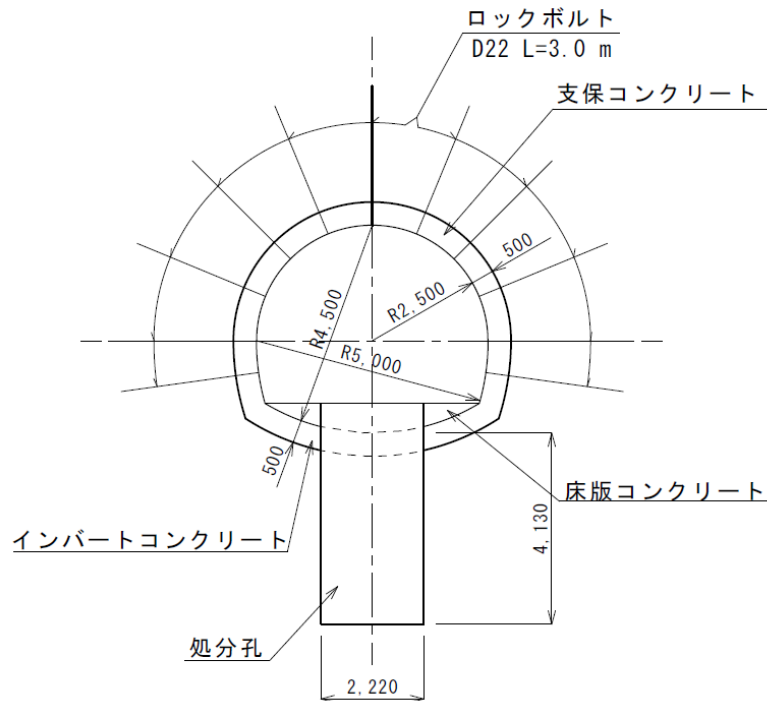
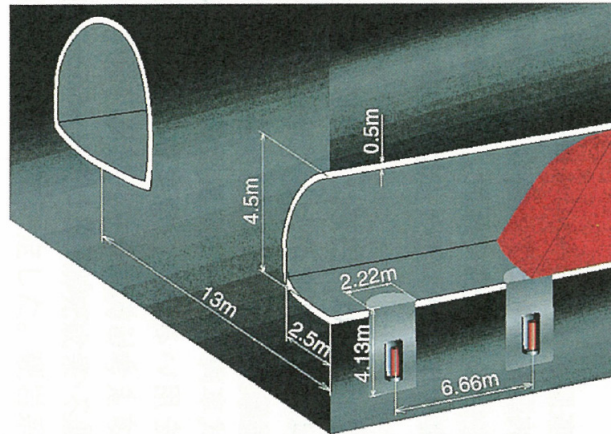


図 3.1-1 処分坑道断面



(c)処分孔縦置き方式（軟岩系岩盤）

図 3.1-2 坑道離間距離および廃棄体ピッチ（核燃料サイクル開発機構，1999a）

## ②止水プラグおよび強度プラグ

図 3.1-3 に止水プラグと強度プラグの相互位置関係を示す。強度プラグは、埋め戻し材の膨出を抑制するためと、止水プラグの膨潤変形を抑制するために設置される。止水プラグの材料は、カナダの AECL の「トンネルシーリング性能試験」(藤田・杉田，1998) を参考にして、ベントナイト・ケイ砂混合土（ケイ砂混合率 30%）とし、乾燥密度を  $1.90 \text{ Mg/m}^3$ ，最大膨潤圧を  $1.0 \text{ MPa}$  と設定した。また、強度プラグは無筋コンクリートとし、その設計基準強度は  $40 \text{ MPa}$ ，弾性係数は  $40,000 \text{ MPa}$  とした。また、坑道延長方向への有意な変位の発生を防止するために、アンカーボルトを設置する構造とした。図 3.1-4 に止水プラグの形状と寸法を，図 3.1-5 と図 3.1-6 に強度プラグの形状と寸法を示す。なお，各部位の形状および寸法は仮に設定したものであり，実際の設計においては，工学的成立性と長期安全性の観点から，性能の照査を行ったうえで決定されることが必要である。

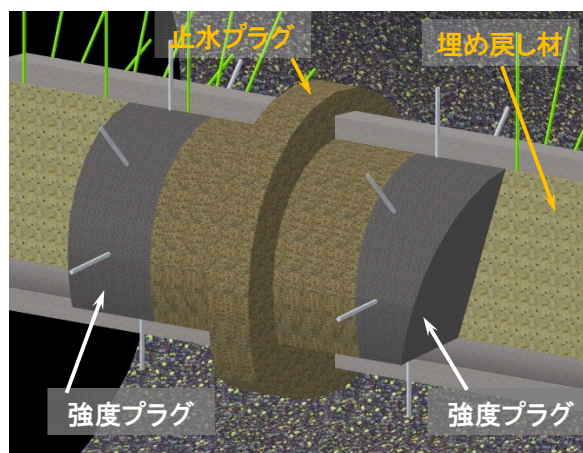


図 3.1-3 止水プラグと強度プラグの位置関係



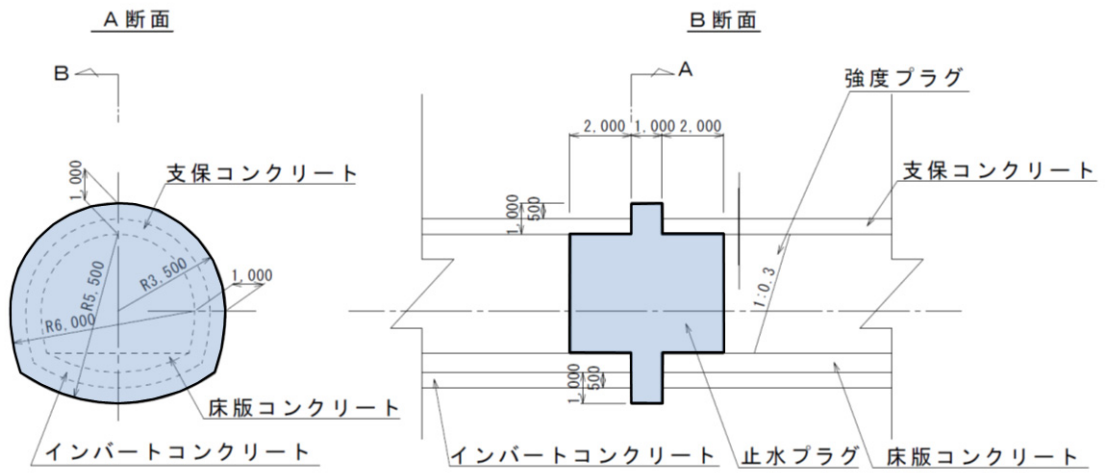


図 3.1-4 止水プラグの形状・寸法

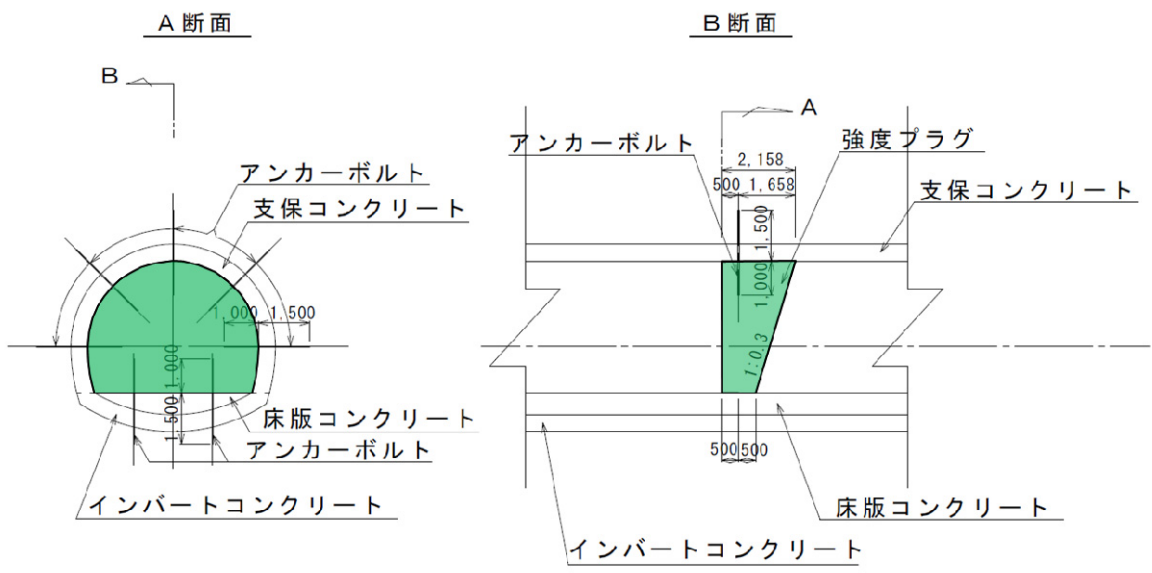


図 3.1-5 強度プラグの形状・寸法 (埋め戻し材側)

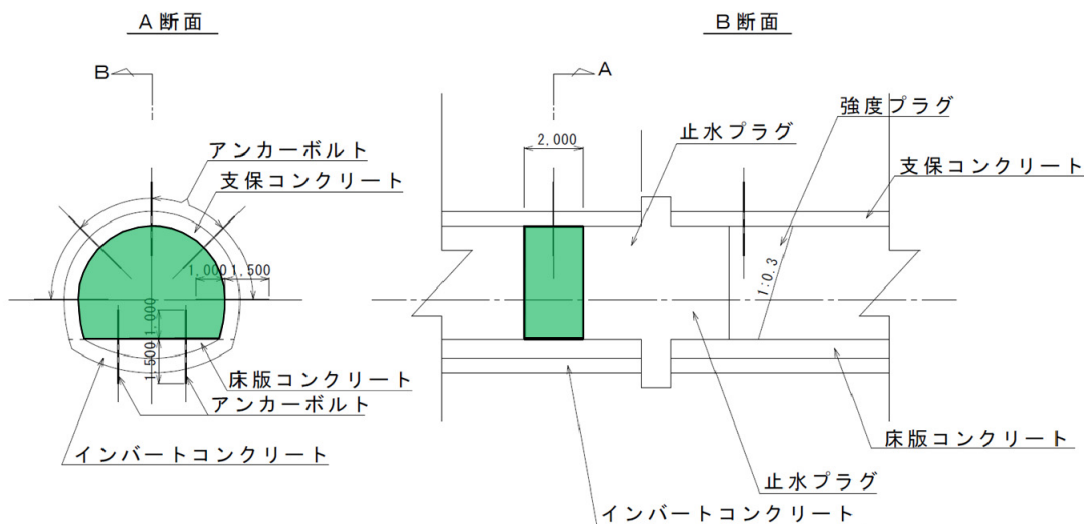


図 3.1-6 強度プラグの形状・寸法（連絡坑道側）

### ③グラウト

本検討においては、処分坑道の全長にわたりグラウチングを施工するものとした。グラウチングによる改良範囲は、国内におけるグラウチングの施工実績を参考にして（日本原子力研究開発機構，2009），トンネル切羽から前方に 30 m，断面方向に直径が最大 1.5 m（トンネル直径の 3 倍）とした（図 3.1-7 参照）。

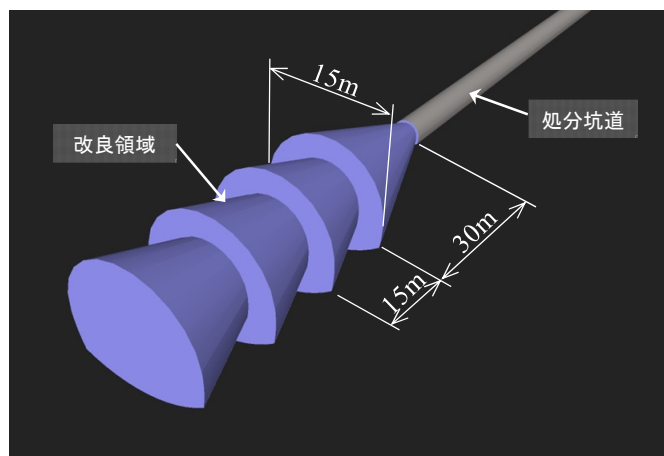


図 3.1-7 グ라우チングによる改良範囲の概念図

### ④埋め戻し材

埋め戻し材は、第2次取りまとめ一分冊2（核燃料サイクル開発機構，1999a）における検討を参考にして、材料をベントナイト・掘削ズリ混合材（掘削ズリ混合率 85 w%），乾燥密度  $1.80 \text{ Mg/m}^3$ ，有効粘土密度  $0.64 \text{ Mg/m}^3$  と設定した。この場合，膨潤圧は  $0.2 \text{ MPa}$  未満と想定される。

### ⑤緩衝材

緩衝材は、第2次取りまとめ一分冊2（核燃料サイクル開発機構，1999a）における検討を参考に、ベントナイト・ケイ砂混合土（重量比率，7:3），乾燥密度を  $1.6 \text{ Mg/m}^3$  とした。

### ⑥オーバーパック

オーバーパックの材質は炭素鋼を想定し、第2次取りまとめ一分冊2（核燃料サイクル開発機構，1999a）で示された形状・寸法と同様とした。図 3.1-8 に人工バリアの仕様を示す。

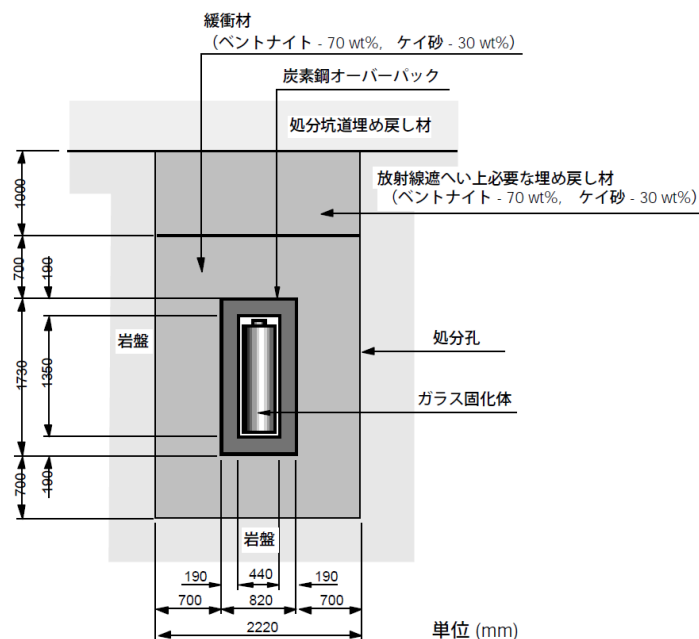


図 3.1-8 人工バリアの仕様（核燃料サイクル開発機構，1999a）

#### (4) 各部位の使用セメント量と表面積の設定

各部位のセメント溶脱挙動は、その部位の表面積に依存すると考えられる。このため、セメント適用部位の溶脱が継続する期間を相対的に評価するには、各部位の溶脱が支配的に生起する面の単位表面積（以下、「有効単位表面積」という）あたりのセメント使用量を設定しておくことが必要と考えた。表 3.1-3 に算出した数量の一覧を示す。なお、数量計算の過程は付録に示す。

表 3.1-3 単位表面積あたりのセメント使用量

部 位	体 積	単位 セメント量	セメント 使用量	対象表面積	有効単位表面積 あたりセメント使用量
支保 コンクリート	5.70 m <sup>3</sup> /m	400 kg /m <sup>3</sup>	2,280 kg /m	12.18 m <sup>2</sup> /m	187 kg /m <sup>2</sup>
インバート コンクリート	2.83 m <sup>3</sup> /m	400 kg /m <sup>3</sup>	1,132 kg /m	6.46 m <sup>2</sup> /m	175 kg /m <sup>2</sup>
床版 コンクリート	2.00 m <sup>3</sup> /m	400 kg /m <sup>3</sup>	800 kg /m	4.85 m <sup>2</sup> /m	165 kg /m <sup>2</sup>
強度プラグ (連絡坑道側)	32.9 m <sup>3</sup>	400 kg /m <sup>3</sup>	13,160 kg	30.47 m <sup>2</sup>	432 kg /m <sup>2</sup>
グラウト	1.60 × 10 <sup>-4</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	1,360 kg /m <sup>3</sup>	0.218 kg /m <sup>3</sup>	1.6 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	0.136 kg /m <sup>2</sup>
ロックボルト 定着材	1.01 × 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /m	900 kg /m <sup>3</sup>	0.909 kg /m	0.13 m <sup>2</sup> /m	6.99 kg /m <sup>2</sup>

以下に各部位の数量算出の考え方を示す。

#### ①支保コンクリートおよびインバート

支保コンクリートおよびインバートの単位長さあたりの体積は、処分孔を含まない断面から算出した。単位体積当たりのセメント量については、設計基準強度が 40 MPa のコンクリートに関する既往の検討事例（日本原子力研究開発機構，2010a）を参考にして、400 kg /m<sup>3</sup> とした。

#### ②床版コンクリート

床版コンクリートの単位長さあたりの体積は、支保工と同様に処分孔を含まない断面から算出した。単位体積当たりのセメント量については、支保工と同様に 400 kg /m<sup>3</sup> とした。

有効単位表面積は、岩盤側への溶脱が卓越するものとし、インバートとの接触面積を考慮した。

#### ③強度プラグ

強度プラグは連絡坑道側を対象として数量を算出した。単位体積当たりのセメント量については、支保工と同様に 400 kg /m<sup>3</sup> とした。

有効単位表面積は、岩盤側への溶脱が卓越するものとし、支保工および床版コンクリートとの接触面積を考慮した。

#### ④グラウト

グラウトが注入される開口した亀裂の体積は、第2次取りまとめ 一分冊3（核燃料サイクル開発機構，1999b）において亀裂性媒体を対象とした安全評価に用いられた亀裂密度（ $0.8 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ）と亀裂開口幅の標準正規変量の平均値  $2.0 \times 10^{-4} \text{ m}$  を用い算出した。グラウトはこのようにして算出された亀裂に全て充填されるものとして、その体積を設定した。単位体積当たりのセメント量算出においては、セメントの密度を  $3.0 \text{ Mg}/\text{m}^3$  とし、内田ほか（2006）の研究を参考に、グラウトが注入の過程で脱水され、水セメント比が 0.4 にまで低下し、亀裂に充填されているものとし  $1360 \text{ kg}/\text{m}^3$  とした。

#### ⑤ロックボルト定着材

ロックボルト定着材の単位セメント量は、メーカーカタログ（株式会社 ケー・エフ・シー，2013）を参考にして、 $900 \text{ kg}/\text{m}^3$  とした。なお、有効単位表面積については、溶脱が岩盤側に卓越するものと仮定し、岩盤との接触面積を考慮した。

### 3.1.2 施工手順の設定に基づく長期変質への影響要因の抽出・整理

処分坑道周辺のシステムの長期的な変質に関しては、建設・操業段階における施工方法に依存して生じる初期の欠陥や施工環境などの外的要因が、その進行の速さや程度に影響を与えることが考えられる。このため、状態変遷の試行に先立ち、これら影響要因の所在を把握し、それぞれが有意なものとなるか否かを判断しておく必要があると考えられる。ここでは、建設・操業の施工手順を明確にしたうえで、余裕深度処分を対象とした検討（土木学会エネルギー委員会，2008）を参考にして、その各段階での長期的な変質への影響要因を抽出・整理する。

#### (1) 処分坑道の建設、人工バリアの定置および埋戻しの手順

ここでは、操業プロセスのうち、処分坑道の構築から処分坑道坑口のプラグ構築までについて、第2次取りまとめの成果を参考にしつつ、既往の技術で合理的に実現可能であろうと思われる施工方法および施工手順を設定した。図 3.1-9 に処分坑道の構築から処分坑道端部のプラグ構築までの一連のプロセスの施工順序を示す。

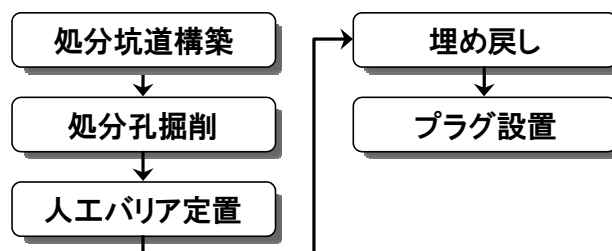


図 3.1-9 処分坑道における一連のプロセスの施工順序

### ①処分坑道構築

図 3.1-10 に処分坑道の施工フローを示す。

グラウチング施工のサイクルとしては、グラウチング施工後 15 m を掘進し、次のグラウチング施工を繰り返すこととした。

坑道の掘進については、掘削（掘進長を 1.5 m に設定）と上半の支保工（吹付けコンクリートとロックボルト）施工までを 1 サイクルとし、掘進が 15 m 完了するまでこのサイクルを繰り返す。

インバートコンクリートについては、掘進が 15 m 進んだ後、切羽後方において延長 15 m 分を吹付けコンクリートにて施工することとした。

床版コンクリートについては、処分坑道全体のインバートの施工が完了した後に施工することとした。

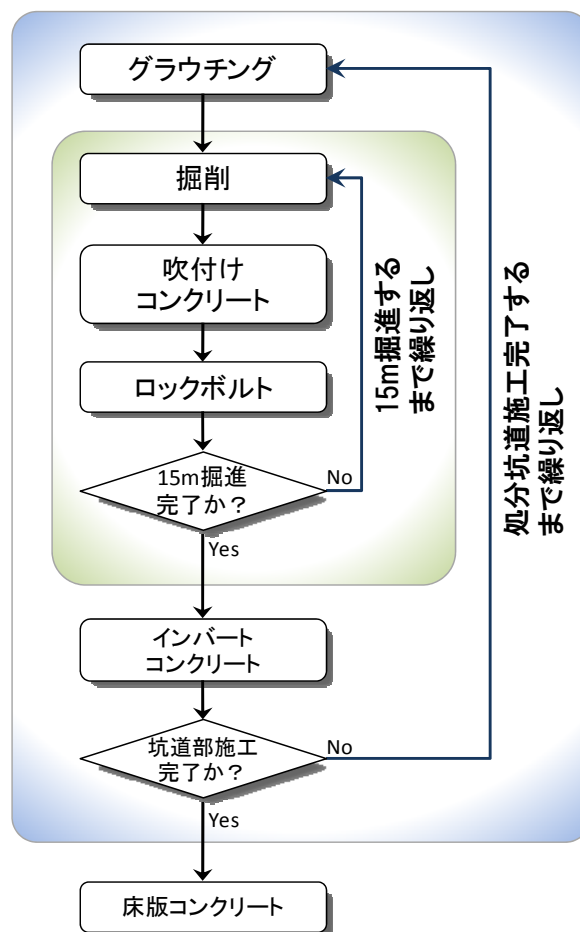


図 3.1-10 今回の検討において設定した坑道構築のフロー

## ②処分孔削孔

処分孔の掘削は、第2次取りまとめ一分冊2（核燃料サイクル開発機構，1999a）における検討において、軟岩系の岩盤の場合、ロータリー掘削工法が選定されており、本検討でもこれに倣うこととした。図 3.1-11 にロータリー掘削機の概要を示す。

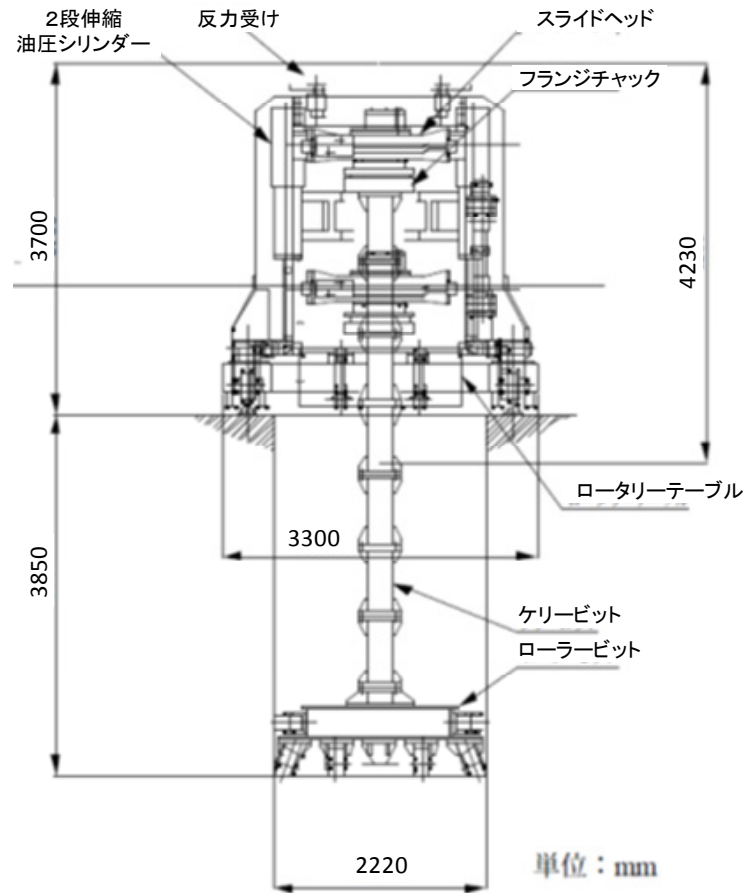


図 3.1-11 ロータリー掘削機の概要（核燃料サイクル開発機構，1999a）

## ③廃棄体の定置

廃棄体の定置方法は、既往の検討において原環機構が例示している方法・手順（図 3.1-12 参照）を適用することとした（原子力発電環境整備機構，2004）。



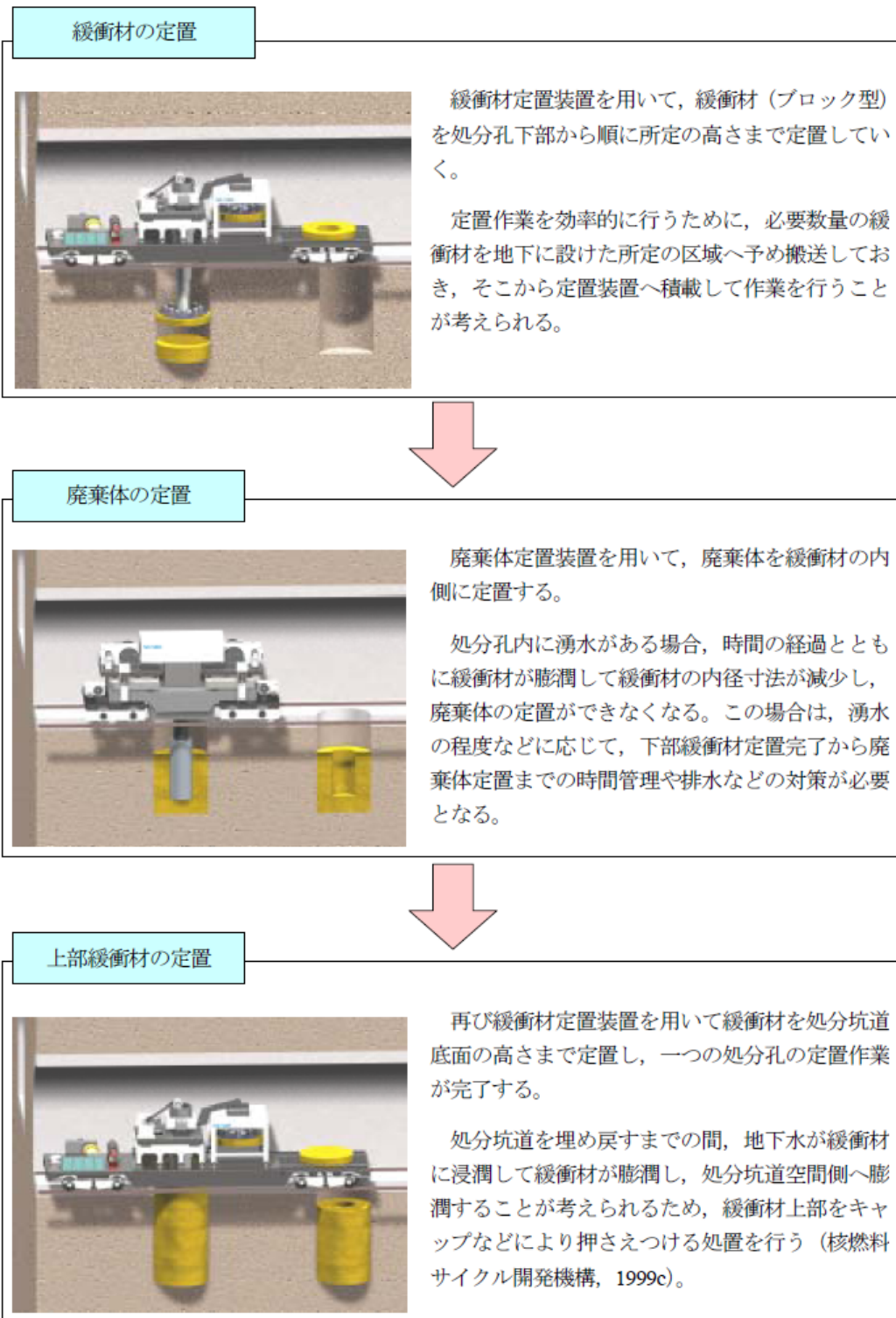


図 3.1-12 廃棄体定置手順（処分孔縦置き、緩衝材ブロック定置）

（原子力発電環境整備機構，2004）

#### ④埋め戻しの施工

埋め戻しについては、第2次取りまとめ 一分冊2（核燃料サイクル開発機構，1999a）

を参考にして、下半部をまきだし・締固め工法（図 3.1-13（左））にて施工し、上半部を横締固め工法（図 3.1-13（右））で施工し、端部を 1:0.3 の勾配で仕上げることにした。

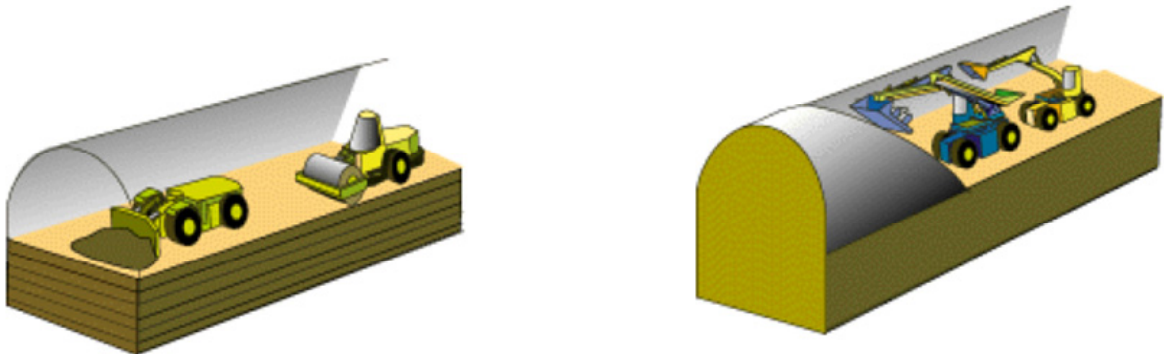


図 3.1-13 埋め戻し工法概念図（核燃料サイクル開発機構，1999a）

（左）まきだし・締固め工法，（右）横締固め工法

## ⑤ プラグ設置

埋め戻し材側の強度プラグは、埋め戻し完了後に、埋め戻し材に接触するように打設する。

止水プラグの切欠き部分の地山の成型については、該当する箇所のコンクリート支保工およびロックボルトを撤去した後、掘削機械により岩盤を掘削する。躯体の構築については、隙間の発生を極力低減するために、切欠き部分を吹付けベントナイト工法で施工し、その他の部分はブロック工法により施工する。最後に止水プラグの変形を防止するために、止水プラグの連絡坑道側にも、これに接するように強度プラグを設置することとした。

### (2) 施工段階に存在するバリア性能への影響要因の抽出

ここでは(1)で設定した施工段階において存在する処分システムのバリア性能への影響要因を抽出し、さらにそれを軽減・回避するための対策を整理した。図 3.1-14 から図 3.1-19 に各施工段階における影響要因とその対策を示す。これらから、いずれの影響要因に対しても工学的な対策を取ることが可能であると考えられる。このことから、長期の状態変遷の検討において、施工方法によるバリア性能への影響は、適切な対策が取られるため考慮する必要がないものと仮定し検討を進める。

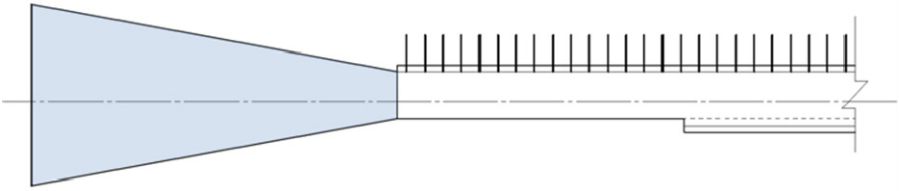
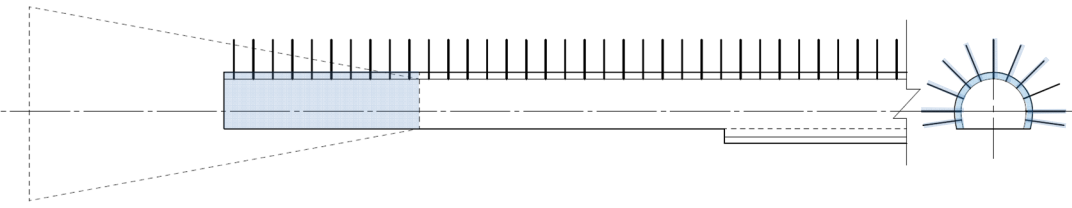
工程	概要図	影響要因と対策
グラウチング	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ プレグラウチングを基本とする。</li> <li>・ 切羽から前方に 30 m 程度、トンネル径方向に最大 15 m（トンネル径の 3 倍）程度を目標改良範囲とする。</li> <li>・ グ라우チング後、15m 程度掘進。</li> <li>・ 上の 2 つの工程を繰り返す。</li> </ul>	<p>【影響要因】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ グ라우チングの注入孔が残置した場合、移行経路が生成</li> </ul> <p>【対策】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 注入孔の閉塞</li> </ul>
ロア掘削 アーチ部 ボルト 吹付け コンクリート	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 機械掘削にて施工する。</li> <li>・ 1 回の掘進長を 1.5 m とする。</li> <li>・ 吹付けコンクリートは 1 掘進 (L=1.5 m) ごとにアーチ部のみ施工。</li> <li>・ ロックボルトは、L=3.0 m とし、1 掘進ごとに 1 断面あたり 11 本打設する。</li> </ul>	<p>【影響要因】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ アーチ部とインバート部で打ち継ぎ目が生じ、この部分の透水性が上昇</li> </ul> <p>【対策】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 止水プラグによる水みちの分断</li> </ul>

図 3.1-14 施工時におけるバリア性能への影響要因と対策（グラウチングから上半掘削）

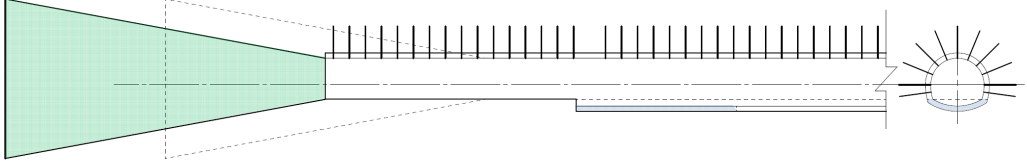
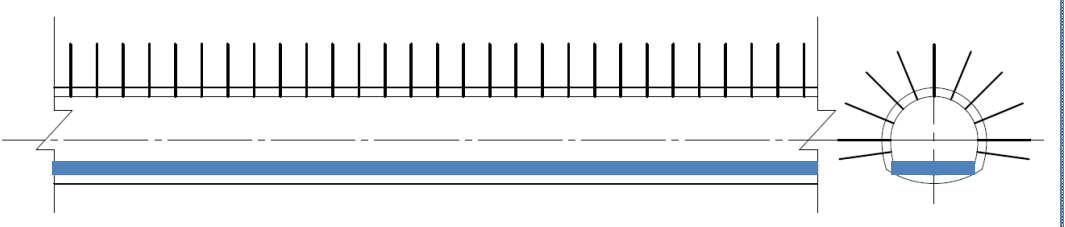
工程	概要図	影響要因と対策
インバートコンクリート	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 15m 掘進の後、切羽後方において延長 15m のスパンでインバート部のコンクリートを吹付けにより施工</li> <li>・ 次のステージのグラウチングを施工.</li> </ul>	<p><b>【影響要因】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ アーチ部とインバート部で打ち継ぎ目が生じ、この部分の透水性が上昇</li> </ul> <p><b>【対策】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 止水プラグによる水みちの分断</li> </ul>
床版コンクリート	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 処分坑道のすべてのインバートコンクリートの施工が完了後、床版コンクリートを施工する。</li> </ul>	<p><b>【影響要因】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 1 回の打設長が長い場合、ひび割れが生じ、透水性が上昇</li> <li>・ インバートコンクリートと床版コンクリートの間に打ち継ぎ目が生じ、この部分の透水性が上昇</li> </ul> <p><b>【対策】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 適切な打設長さの設定</li> <li>・ 止水プラグによる水みちの分断</li> </ul>

図 3.1-15 施工時におけるバリア性能への影響要因と対策（インバートコンクリートから床版コンクリート）

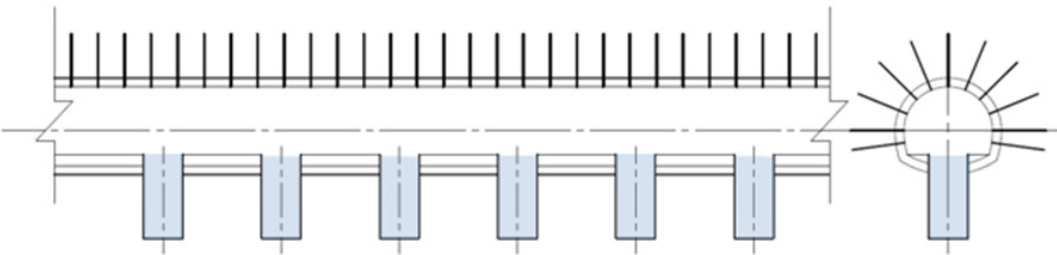
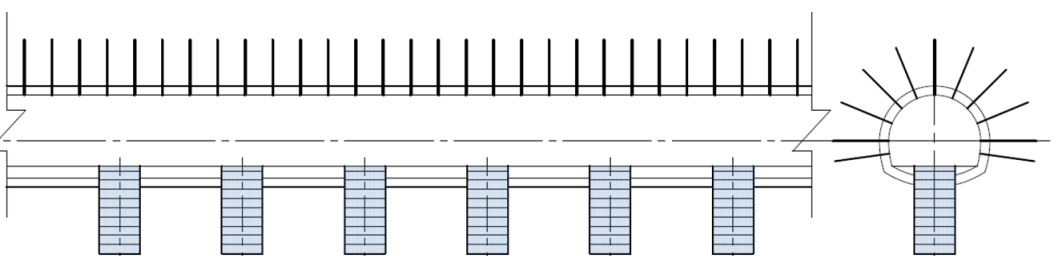
工程	概要図	影響要因と対策
処分孔掘削	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 機械掘削にて施工する。</li> </ul>	<p>【影響要因】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ なし</li> </ul>
緩衝材・廃棄体定置	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 緩衝材ブロックを定置。</li> <li>・ 廃棄体の定置とそれ以降の緩衝材の定置は遠隔作業となる。</li> </ul>	<p>【影響要因】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 処分孔と緩衝材間に隙間が生じ、その結果、緩衝材の密度が低下</li> </ul> <p>【対策】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 密度低下を考慮に入れた、緩衝材設計</li> </ul>

図 3.1-16 施工時におけるバリア性能への影響要因と対策（処分孔掘削から廃棄体定置）

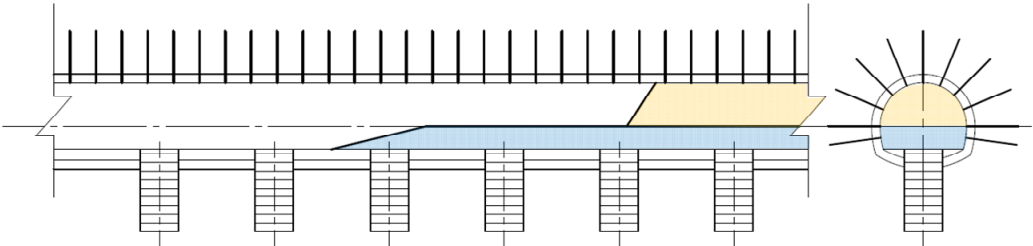
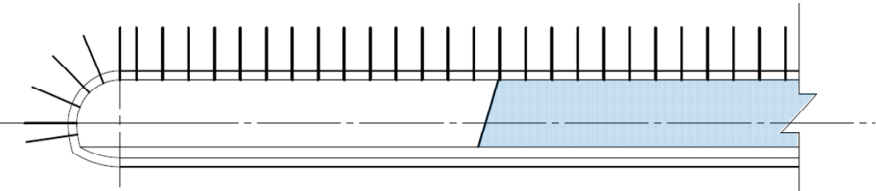
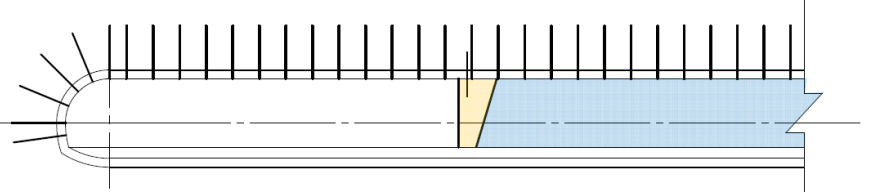
工程	概要図	影響要因と対策
埋め戻し	<p>【施工途中の状況】</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 下半をまきだし・締固め工法で、上半を横締固め工法で施工する。</li> </ul>	<p>【影響要因】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 上半と下半で継ぎ目が発生</li> </ul> <p>【対策】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 膨潤により継ぎ目が有意な影響をおよぼさないような埋め戻し材の材料設計</li> </ul>
	<p>【終端部の状況】</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 終端部は 1: 0.3 の勾配で仕上げる。</li> </ul>	
強度プラグ (廃棄体側)	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 強度プラグを埋め戻し材と接触するように設置する。</li> </ul>	<p>【影響要因】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 打設中に埋め戻し材がコンクリートの水分を吸収し、膨潤変形</li> </ul> <p>【対策】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 埋め戻し材と強度プラグの界面に遮水性の隔壁を設置</li> </ul>

図 3.1-17 施工時におけるバリア性能への影響要因と対策（埋め戻しから強度プラグ）

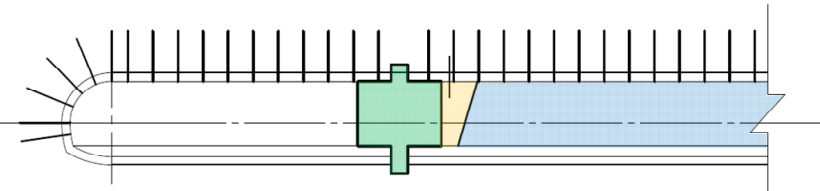
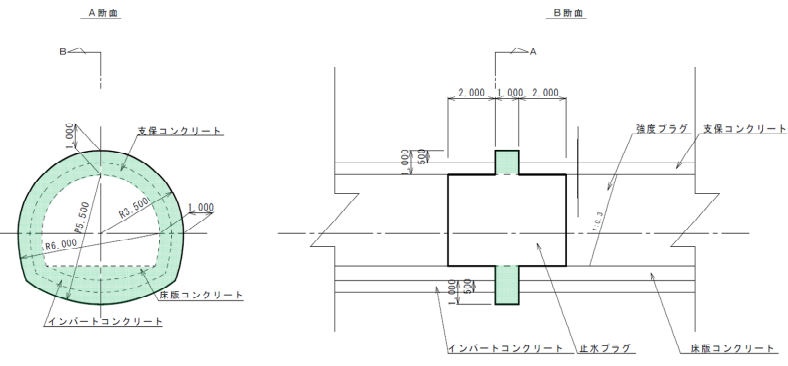
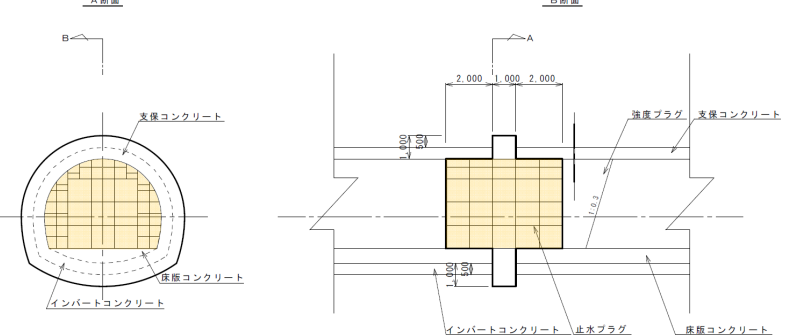
工程	概要図	影響要因と対策
止水プラグ	 <p>・ 止水プラグは下のよう分割して施工する。</p>	
	 <p>・ 切り欠き部のコンクリート（支保工、底版、インバート）を撤去する。</p> <p>・ 切り欠き部の岩盤を掘削機械にて掘削する。</p> <p>・ ベントナイト吹付け工法にて、左図の着色部分にベントナイトを充填する。</p>	<p><b>【影響要因】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>岩盤からの湧水により、吹付け中にベントナイトが膨潤</li> </ul> <p><b>【対策】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>グラウチングによる有意な湧水の低減</li> </ul>
	 <p>・ 切り欠き部以外の部分は、ブロック状のベントナイトを積み重ねて止水プラグを構築する。</p>	<p><b>【影響要因】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>吹付けにより施工したベントナイトとの境界における隙間の発生</li> </ul> <p><b>【対策】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>隙間への膨潤変形による密度低下を考慮した緩衝材ブロック仕様の設定</li> </ul>

図 3.1-18 施工時におけるバリア性能への影響要因と対策（止水プラグ）

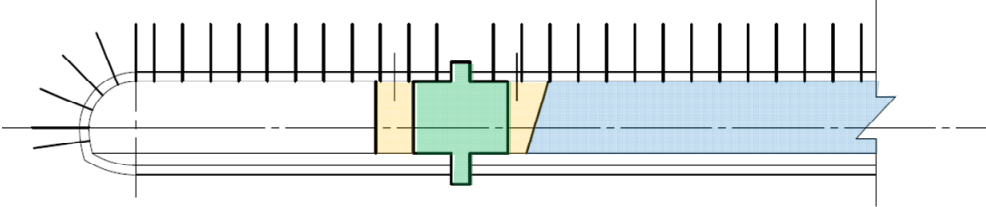
工程	概要図	影響要因と対策
強度プラグ (連絡坑道側)	 <ul style="list-style-type: none"> <li>止水プラグの変形を防止する目的で、連絡坑道側に強度プラグを設置する。</li> </ul>	<p><b>【影響要因】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>打設中に止水プラグがコンクリートの水分を吸収し、膨潤変形</li> </ul> <p><b>【対策】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>止水プラグと強度プラグの界面に遮水性の隔壁を設置</li> </ul>

図 3.1-19 施工時におけるバリア性能への影響要因と対策（連絡坑道側強度プラグ）



### 3.1.3 各部位の状態変遷の推定

2章では、各部材の要求機能に影響を及ぼす要因としてセメント系材料の変質を整理した。ここでは、状態変遷の試行に必要となるセメント系材料自体の変質、および岩石やベントナイト材料に及ぼす影響について、長期の経時変化の観点から既往知見を整理し、状態変遷の推定を行う。

#### (1) セメント系材料と母岩が接触する部位

##### ①岩に接触するコンクリートの溶脱変質状態の予測解析事例

Atkinson (1985) は、OPC 硬化体が溶脱変質する状態と液相の pH の関係を図 3.1-20 のように示した。硬化体中の水酸化カルシウムが消失すると pH が低下する傾向になり、併せて C-S-H 相から Si も溶脱し始める。また、図 3.1-21 には、地下水 ( $10^{-10}$  m/s) が OPC コンクリート (半径 20m 坑道, 断面構成の半分が  $370 \text{ kg/m}^3$  の富配合コンクリートとなる平均  $185 \text{ kg/m}^3$  の OPC 量として解析) に接触する場合の総接触水量と溶脱変質程度を解析した結果を示す。この結果に基づけば、溶脱変質の進展に伴う C-S-H の Ca/Si 比の低下が 0.85 まで進展し、pH が 10.5 の状態が中心部 (半径 20 m) に到達するのは約  $10^6$  年以降とする解析結果を示した (図 3.1-21)。しかし、感度解析として地下水に Mg, 炭酸イオンなどの反応性イオンが含まれる場合は、C-S-H に含まれる Ca が不安定化するために pH 低下速度が高まる。様々な岩種中の地下水ではいずれもそれらの有害成分が  $10^{-2} \text{ mol/l}$  程度含まれるため、pH 低下速度は 4 倍程度まで高まること、そして、環境条件として透水係数を  $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  に高めた場合は、pH 低下時期が 1,000 年程度に短縮されるとの解析結果も示される。

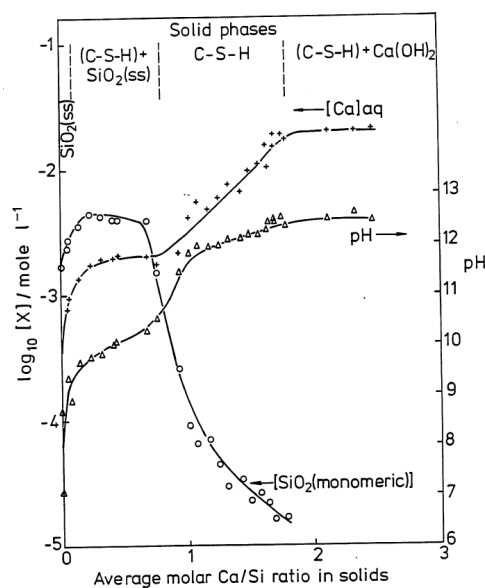


図 3.1-20 Ca/Si 比の異なる C-S-H 相の溶脱変質状態 (Atkinson, 1985)

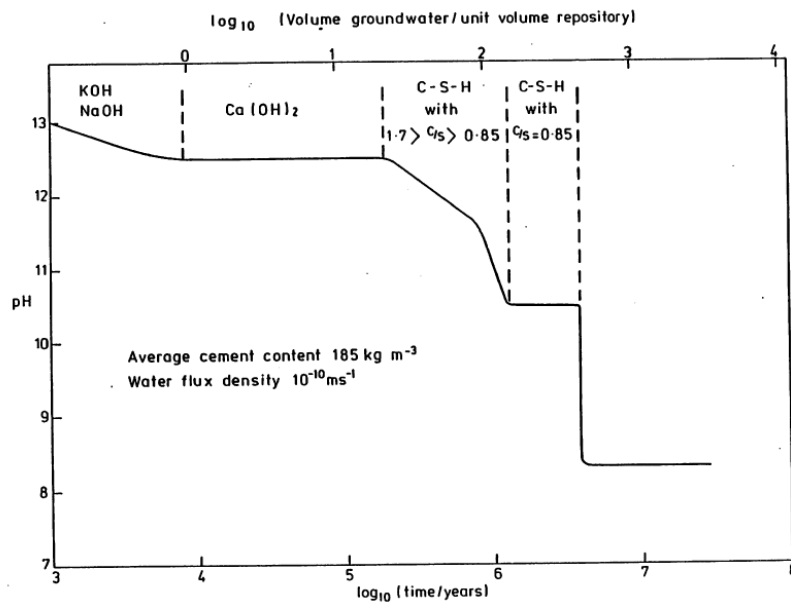
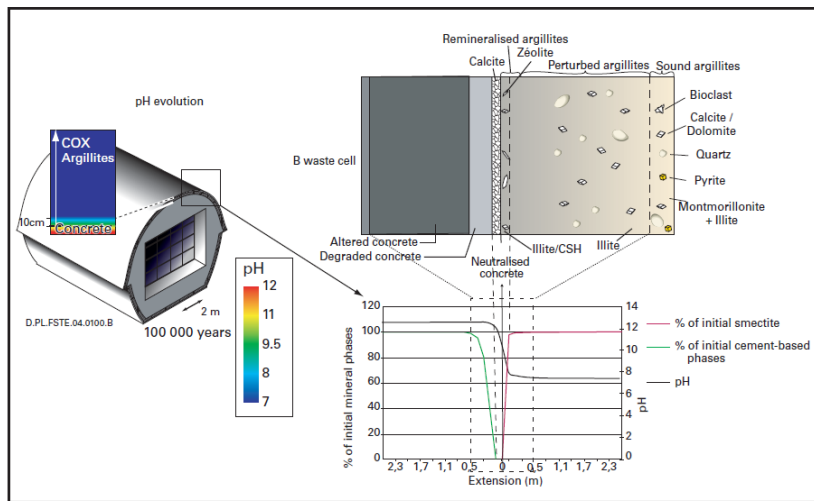


図 3.1-21 コンクリート地下施設の溶脱変質状態の解析結果 (Atkinson, 1985)  
 (OPC を  $185\text{kg/m}^3$  で使用した半径  $20\text{m}$  の地下施設が  $10^{-10}\text{m/s}$  の地下水に接触すると想定した解析結果)

## ②泥岩質母岩とコンクリートの接触面近傍における相互作用の解析事例

Marty et al. (2009) は、OPC を用いたコンクリート (拡散係数  $1.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ) が COX (Callovo-Oxfordian) 粘土層 (有効拡散係数  $1.5 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$ ) に接触した場合に粘土層へもたらされるアルカリ影響に関する感度解析を行った (図 3.1-22, 図 3.1-23, 図 3.1-24)。粘土層を構成する鉱物の溶解に関するデータが十分に揃っていないため、解析精度に課題が残されるとしている中で、コンクリート表層部にはトバモライト  $11 \text{Å}$  型などが、そして粘土層表層部には Ca 型フィリップサイトなどが  $10^3 \sim 10^4$  年の間に析出することを示した。なお、コンクリートは、母岩界面から  $0.5 \text{m}$  まで変質し、廃棄体界面にまで変質フロントが達するという結果である。



Scheme of alkaline perturbation in argillites around B waste cells and of lining concrete degradation at 100,000 years

図 3.1-22 Marty et al. (2009) が解析対象としている施設の断面構成 (ANDRA, 2005)

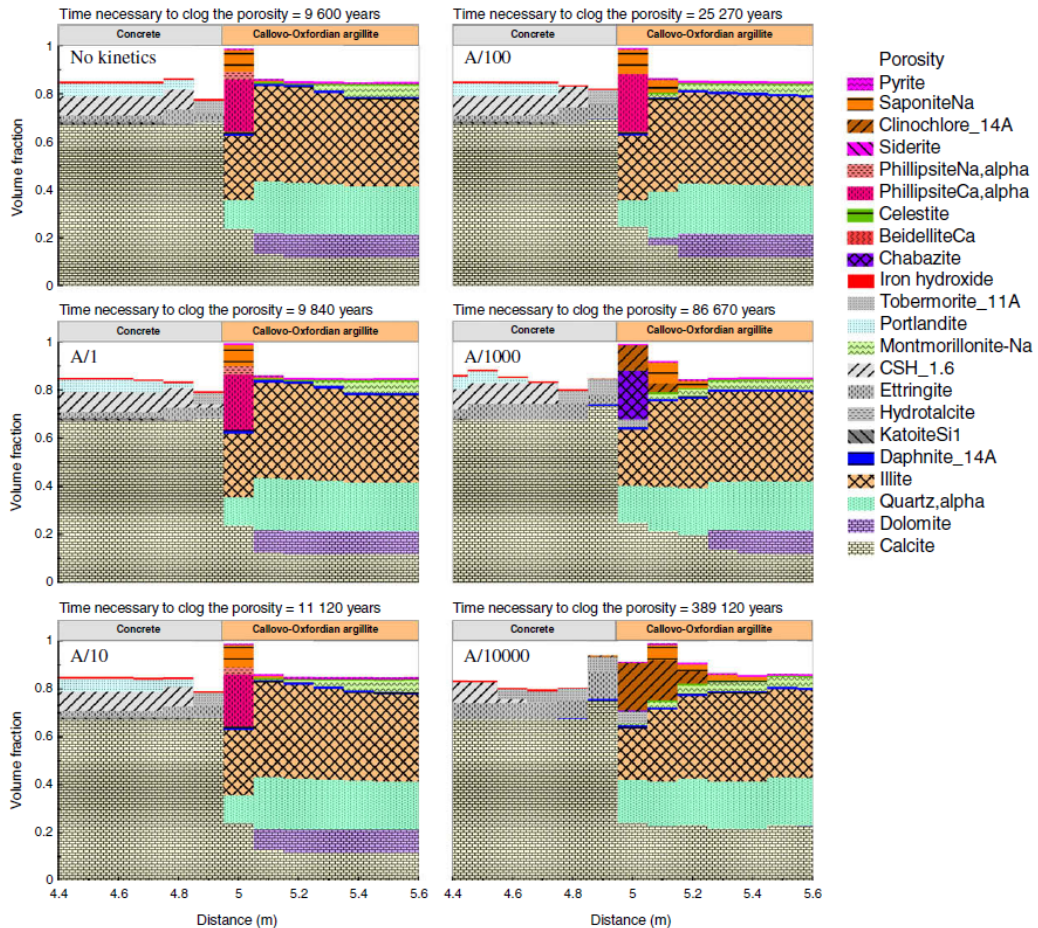


図 3.1-23 粘土層への支保コンクリートのアルカリ影響の解析結果 (Marty et al., 2009)

- ・ TOUGHREACT を用いて鉱物相と空隙率の変化を予測解析
- ・ No kinetic : 熱力学的影響のみ考慮, A/1 : 熱力学的影響と動力学的な影響を考慮, A/10~A/10000 : 接触面の反応面積を実験で測定した値の 1/10~1/10000 に変化させた感度解析
- ・ 粘土/コンクリート接触面近傍をメッシュ幅  $10^{-1}$  m でモデル化

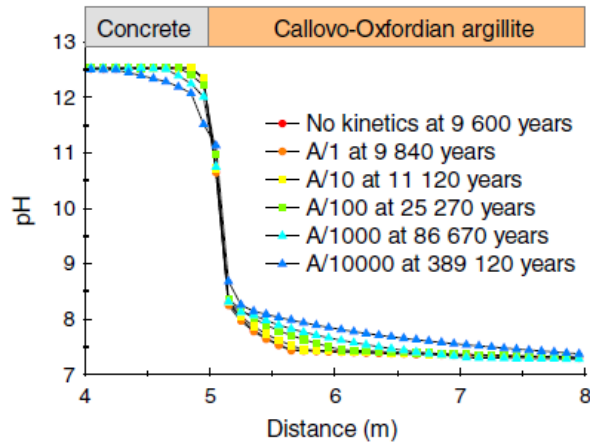


図 3.1-24 コンクリートと母岩の間で生じる相互作用に伴う pH 変化の解析結果  
(Marty et al., 2009)

### ③母岩とコンクリートの接触面近傍における変質状態の解析事例

Wang et al. (2007) は、OPC を用いたコンクリートを廃棄体周囲に人工バリアとして設置し、泥岩層 (Boom clay, 透水係数  $5 \times 10^{-13} \sim 2 \times 10^{-12}$  m/s, イライト/スメクタイト/カオリナイト/クロライトなどで構成) が直接接触するバリア構成を対象として母岩と支保コンクリート間で生じる相互作用を解析した。PHREEQC を用いてコンクリートと Boom Clay の界面で生じる化学的な相互作用を解析し、 $10^5$  年後までにコンクリート表層部では水和物相の溶脱変質が生じ、粘土層界面近傍では鉱物相の溶解とともに二次鉱物が生成することを示した。(図 3.1-25~図 3.1-28)

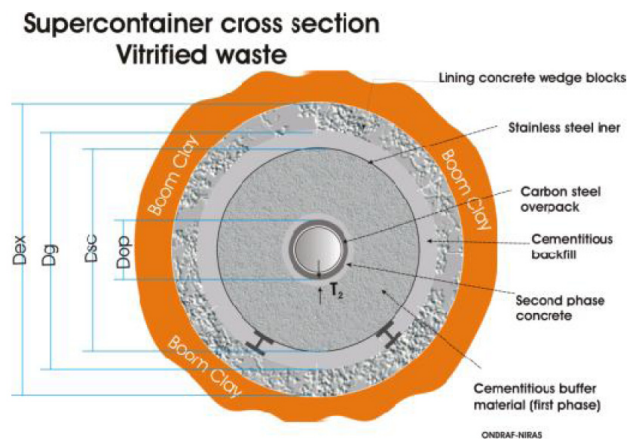


図 3.1-25 Wang et al. (2007) が解析対象としている施設の断面構成

- ・ 高レベル放射性廃棄物のガラス固化体を取り囲む人工バリアとなる一体型容器の構成図 (案)
- ・  $D_{ex}=3.23\text{m}$ ,  $D_g=2.53\text{m}$ ,  $D_{sc}=1.928\text{m}$ ,  $D_{op}=0.516\text{m}$ ,  $T_2=0.05\text{m}$

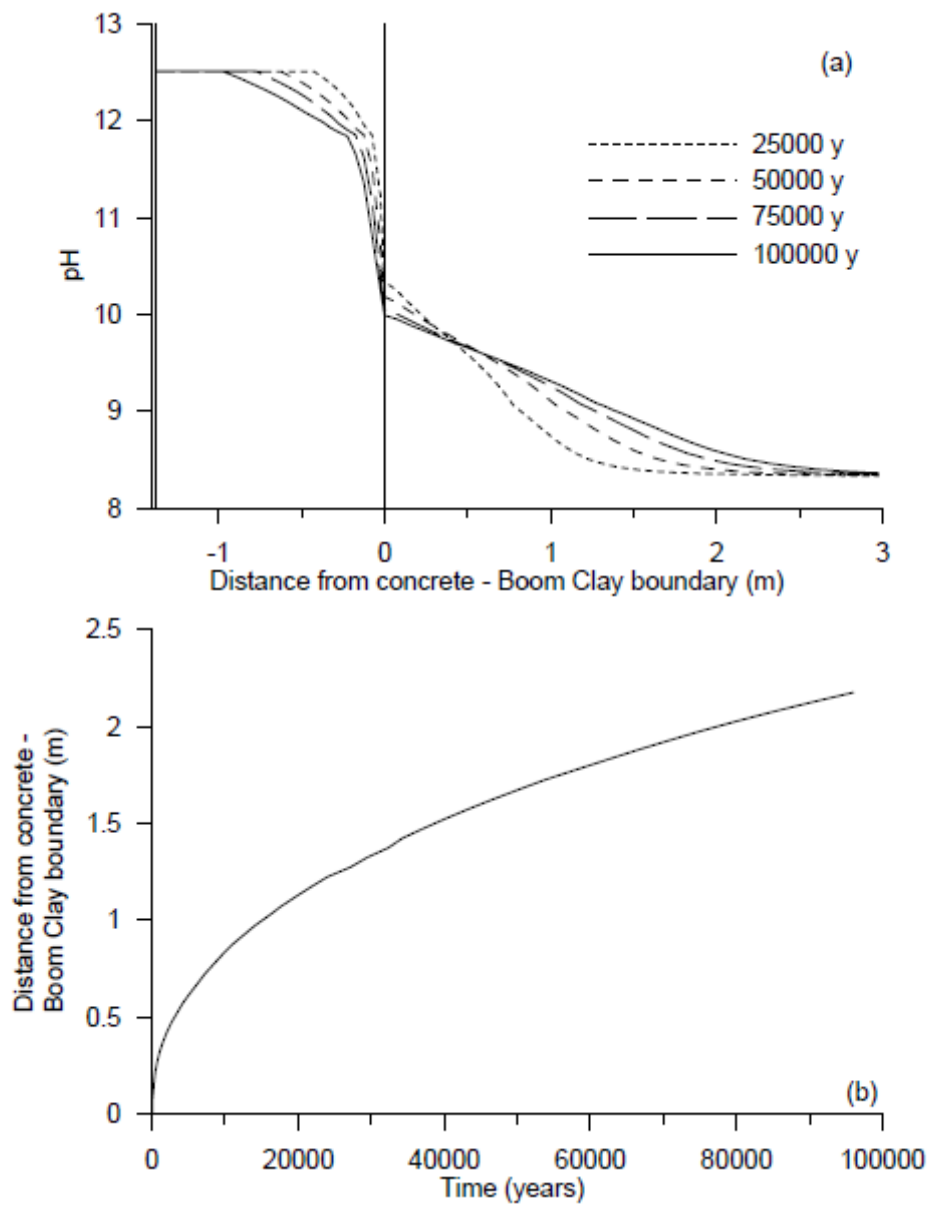


図 3.1-26 アルカリプルームの状態および泥岩層内のアルカリ変質範囲の解析結果  
(Wang et al., 2007)

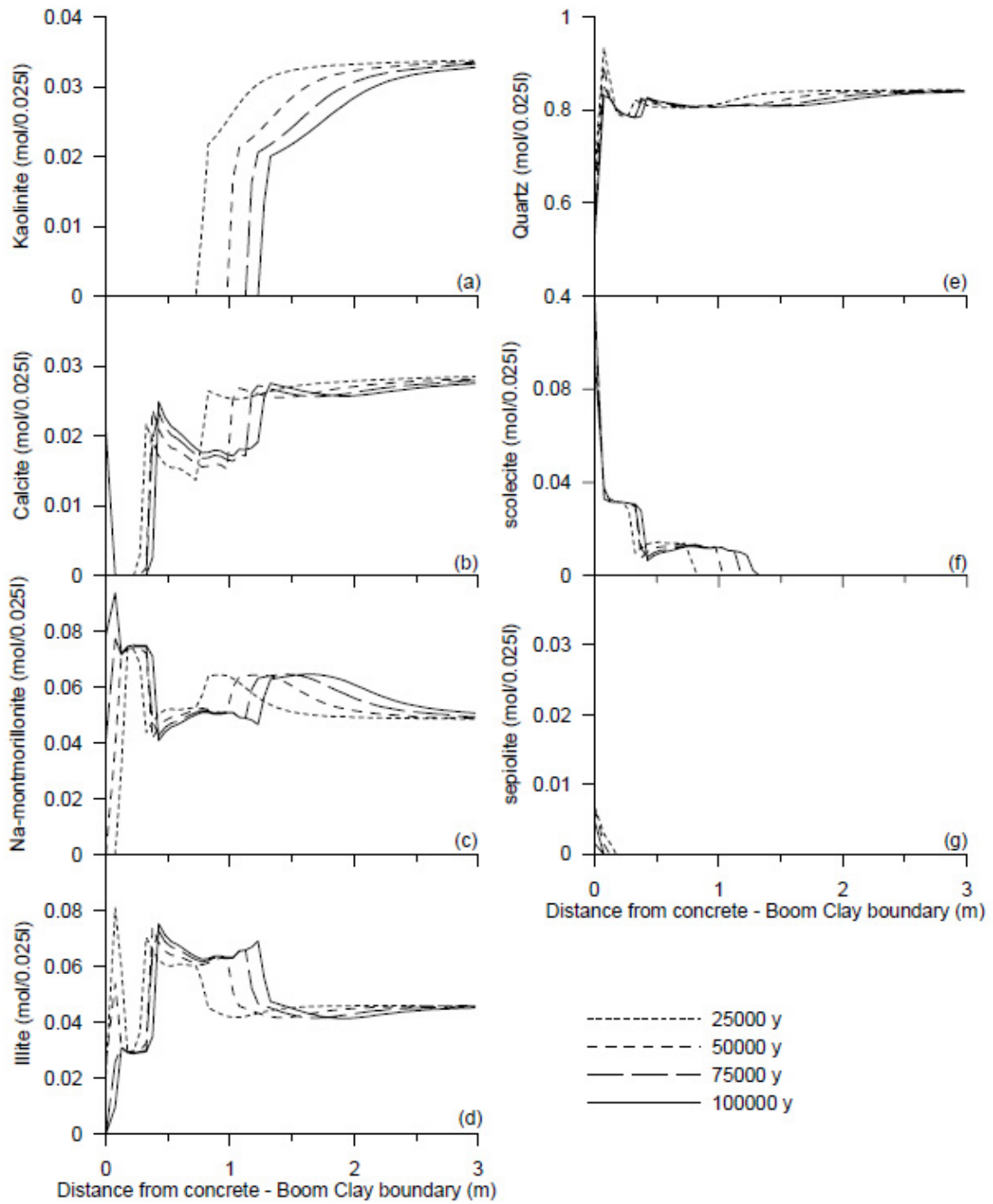


図 3.1-27 支保コンクリートのアルカリ影響に伴う泥岩層の  
 鉱物組成変化の解析結果 (Wang et al., 2007)

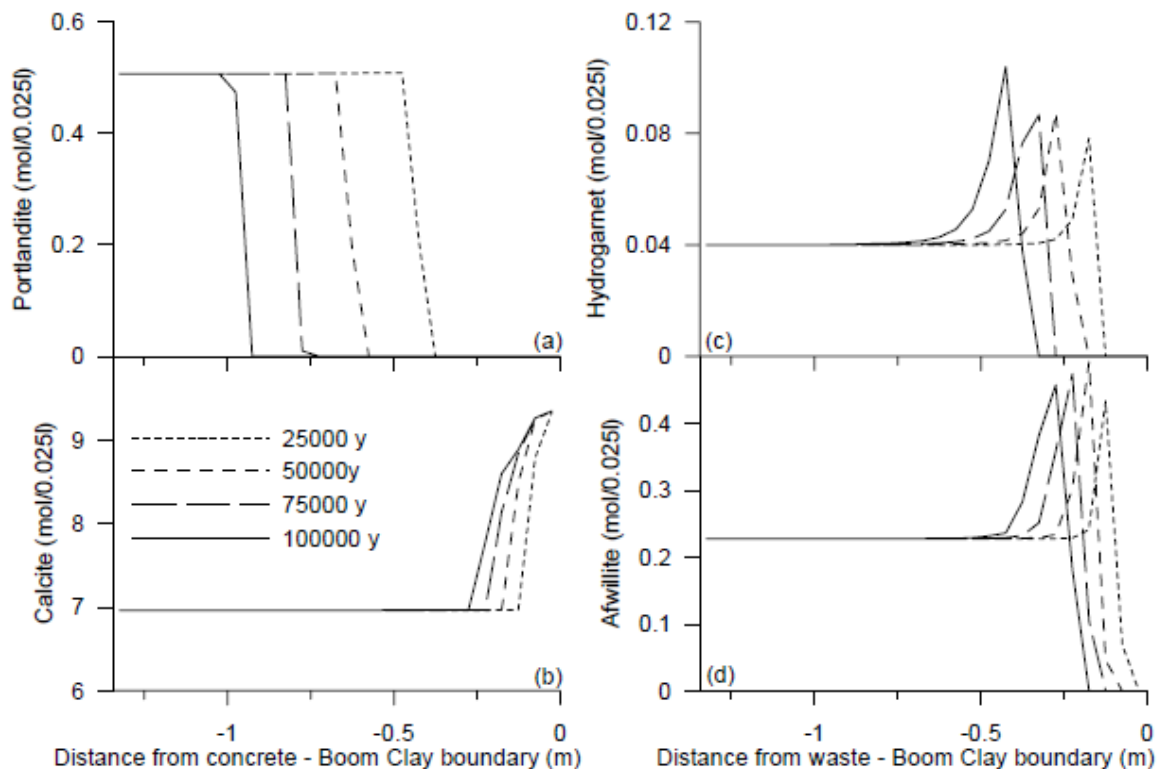


図 3.1-28 泥岩層に吹付けたコンクリートの界面近傍における鉱物相構成量変化の解析結果 (Wang et al., 2007)

#### ④セメント系材料が接触する亀裂内での二次生成物の析出挙動解析

笹本ほか (2009) は、母岩内の亀裂に連続的にセメント由来の高アルカリ成分が流入した場合の二次鉱物の析出状態を解析した。OPC、および低アルカリ性セメント (HFSC) が接する花崗岩亀裂部において、500 年および 1,000 年間に亘り各セメント溶出液が一定の組成で流入する場合、OPC では亀裂内にアナルサイム、トバモライトなどの二次鉱物が沈殿し、開口部近傍の亀裂を充填する現象が生じることを示した。一方、低アルカリ性セメントの場合は、アルカリ影響が少ないため、亀裂内に析出物が僅かに析出する程度であることを示した (図 3.1-29)。



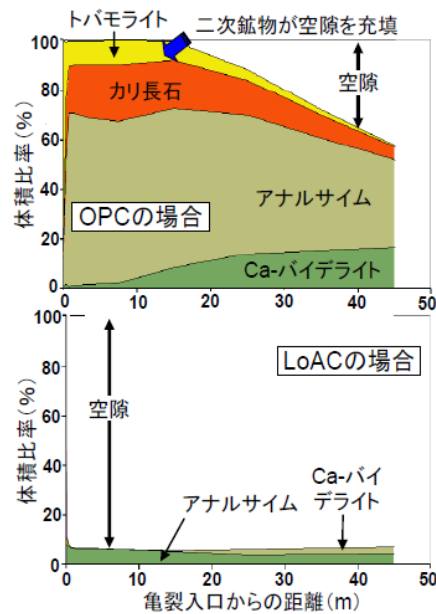


図 3.1-29 花崗岩中の亀裂にセメント由来のアルカリ成分を流し続けた場合の二次鉱物析出状態の解析結果（1,000 年後）（笹本ほか，2009）

#### ⑤本検討で想定した環境条件および材料条件を考慮した母岩とコンクリート間で生じる状態変遷予測

上述の知見を基に本検討で対象とするコンクリート部材のうち、母岩に接触するコンクリートの状態を推定する。本検討では、環境条件として堆積岩、透水係数  $10^{-9}$  m/s、動水勾配 0.01 を想定しており、さらに支保コンクリートは部材厚を 500 mm としている。これらの条件は Atkinson (1985) の解析で用いられた条件に比べると、透水係数は大きく、部材厚は非常に薄いので、図 3.1-21 に示される  $10^5$  年後の状態のコンクリートとなる pH10.5 (Ca/Si 比 0.85 の C-S-H 相) の状態よりも溶脱が進行し、pH がさらに低い状態の C-S-H、つまり Ca 含有率が非常に低い C-S-H が残存する状態になっていると推定できる。そして、溶脱変質の過程で表層部は水酸化カルシウムの消失ならびに C-S-H 相の溶脱変質 (Gaucher et al., 2004) に伴い、表層部は脆弱化、さらには消失する (Lehikoinen et al., 1996) と予測できる。本報告書で想定した部材厚 500 mm の支保コンクリートは、 $10^5$  年経過した時点でセメント水和物相は消失し、骨材のみが残存する状態になっていると推定する。

Marty et al. (2009)、および Wang et al. (2007) で示される知見では、いずれも低透水性の粘土層および泥岩層が検討対象であるため、普通セメントを使用した支保コンクリートが接触する母岩へのアルカリプルームの拡大範囲はいずれも  $10^5$  年経過した時点で 2~3 m であり、コンクリートにおける溶脱変質範囲（水酸化カルシウムの消失範囲）が 0.5 m 程度であることを示している。そして、いずれの検討においても、母岩側では、界面近傍の



変質領域で二次鉱物が生成することを示している。また、笹本 ほか (2009) が示した解析では、pH12.5 となる普通セメントの浸漬水に相当する高アルカリ溶液が花崗岩内の亀裂に浸透し続けるモデルを通して 1,000 年時点で二次鉱物が亀裂開口部近傍に析出することを示している。

本検討では、500 m の被圧地下水、 $1 \times 10^{-9}$  m/s の透水係数で動水勾配を仮定している。また、堆積岩に対して厚さ 500 mm の支保コンクリートを設置することを想定しており、前出の①～④で示した知見で前提とする環境条件とは大きく異なる。本検討で想定した条件は、母岩の透水量が比較的大きく、部材厚さが比較的薄い支保コンクリートであることから、コンクリートに接する母岩の界面近傍では、アルカリ変質を受けることで一旦二次鉱物が析出し、緻密化するが、コンクリートの部材厚が薄いために影響範囲は少なく、その後流水場に曝される過程で二次鉱物が溶脱変質し、消失するとともに pH が低下すると判断した。

なお、地温と廃棄体発熱が合わさることで少し温度が高い時期が継続することで、母岩界面で析出する CSH 状の二次鉱物が溶解度の低いトバモライト状の結晶性 CSH に変化し、比較的長期間緻密な層を吹付け近傍に形成することが予想される。ただし、トバモライトであっても炭酸イオンによる溶解変質影響を受けやすいので、再溶解が生じると推定した。

## (2) セメント系材料とベントナイト系材料が接触する部位

### ①ベントナイト層とコンクリートの接触面近傍における変質状態の解析事例

本検討で想定した吹付けコンクリートと力学プラグが接触する埋め戻し材界面近傍および緩衝材上部で生じるアルカリ変質の程度を推定するために、既往の知見で示されている解析事例を参照する。

第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、2005）では、化学反応・物質移行連成解析コード RAIDEN3 を用いて、モンモリロナイト含有率48%などの組成としたベントナイトを使用した緩衝材と支保工ならびに廃棄体層が接触するモデル（図 3.1-30）で生じる緩衝材のアルカリ変質の進行過程を解析した。初期条件として、緩衝材の乾燥密度= $1.6 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>、ベントナイト：ケイ砂の混合比=70：30、間隙割合0.40としてパラメータを設定し、緩衝材における拡散係数および透水係数は、表 3.1-4 に示すように変質に伴い変化する空隙率の関数で表している。また、環境条件は、降水系高 pH 型地下水（濃度固定条件）、動水勾配 0.01、透水量係数  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s（透水係数  $10^{-9}$  m/s 相当）である。緩衝材に接触する水量は、コンクリート支保を通過する水量として解析しており、コンクリートの透水係数も空隙率の経時変化を取り込んだ関数で表している（表 3.1-4）。

これらの前提条件の下、10<sup>5</sup>年後の状態を解析評価した結果（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、2005）を図 3.1-31～図 3.1-33 に示す。なお、本解析事例で用いたアルカ

リ変質モデルでは圧密ベントナイトを評価対象としているが、解析精度の向上に向けて圧密ベントナイトのアルカリ変質のメカニズムの解明などの課題が残されている。

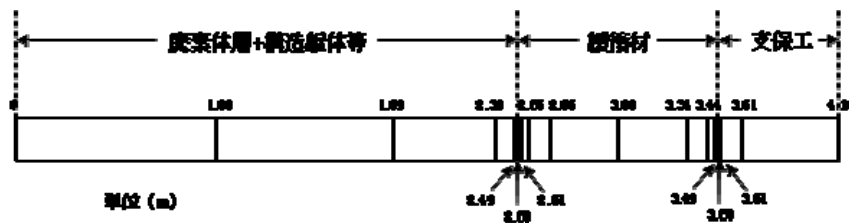


図 3.1-30 支保工コンクリート，緩衝材，廃棄体層+構造躯体間で生じる変質解析の1次元解析モデル（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）

表 3.1-4 緩衝材が受けるアルカリ変質解析における変数設定

（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）

実効拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)	コンクリート	$4.0 \times 10^{-9} \times \varepsilon^{3.05}$ , $\varepsilon$ : 空隙率 (初期 : 0.13)
	ベントナイト	$2.27 \times 10^{-9} \times \varepsilon^n$ , $n=2.22fs^{0.13}+1$ , $\varepsilon$ : 空隙率 (初期 : 0.40) $fs$ : スメクタイト含有率 (初期 : 0.48)
透水係数 (m/s)	コンクリート	$4.34 \times 10^{-9} \times \varepsilon^3 \times (1-\varepsilon)^{-2}$ , $\varepsilon$ : 空隙率 (初期 0.13)
	ベントナイト	$K_0 10^{1.30C_i} (e_{sme})^{3.48C_i}$

緩衝材では、pHの上昇とともにベントナイトはCa型化し、モンモリロナイト、カルセドニなどの鉱物の溶解が進む。そして、モンモリロナイトの溶解に続いてカリ長石、ヒューランダイト、アナルサイム、セピオライトが二次鉱物として生成する（図 3.1-33）。10<sup>4</sup>年後までに緩衝材・支保工界面の支保工側にカルサイトおよびC-S-Hゲルが沈殿することで、間隙が充填されている（図 3.1-32）。この充填物の存在により緩衝材における物質移行は著しく制限され、内部の廃棄体層のpHは比較的高い状態に留まっている（図 3.1-31）。

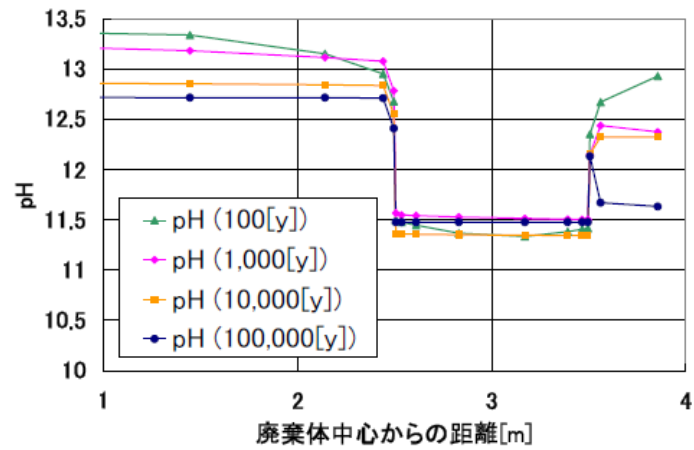


図 3.1-31 pH 分布の経時変化（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）

（準安定ゼオライト，安定相（安定ゼオライト，カリ長石）が生成する場合）

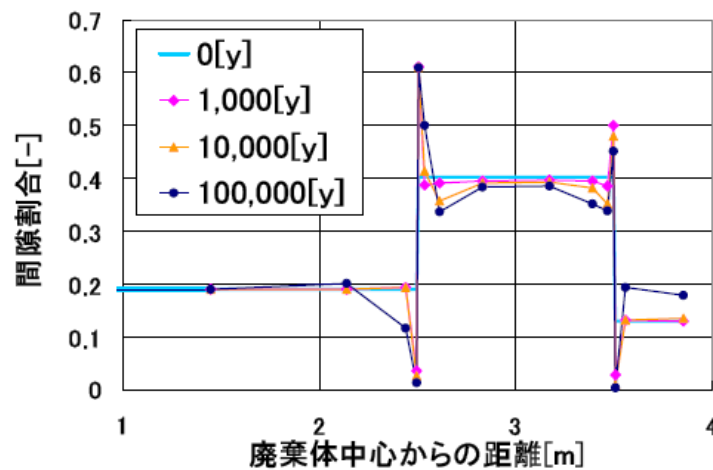


図 3.1-32 間隙割合分布の経時変化（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）

（準安定ゼオライト，安定相（安定ゼオライト，カリ長石）が生成する場合）

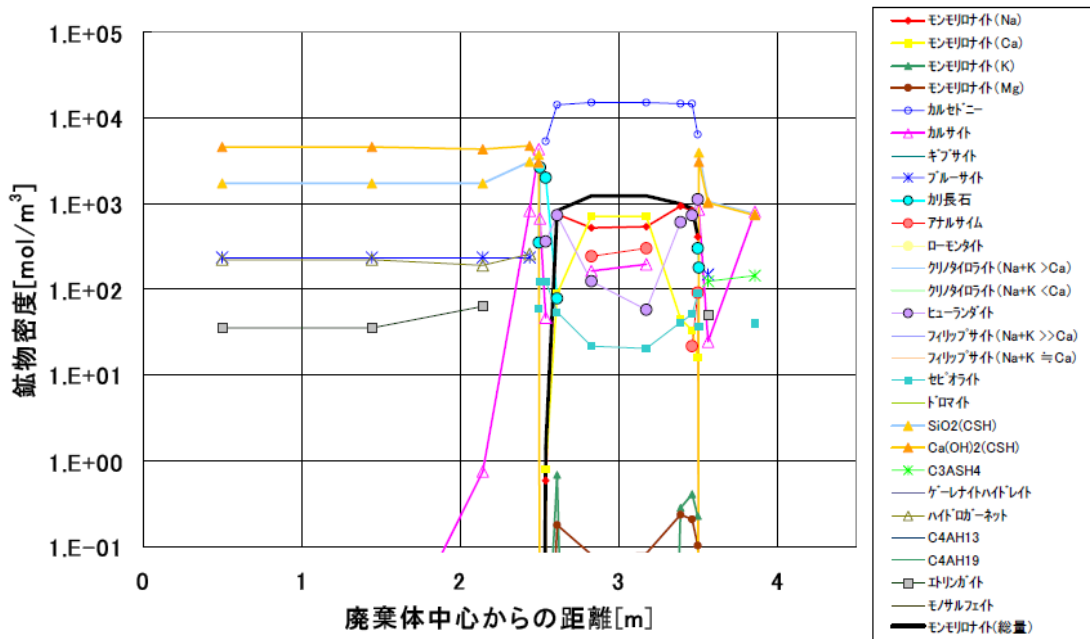


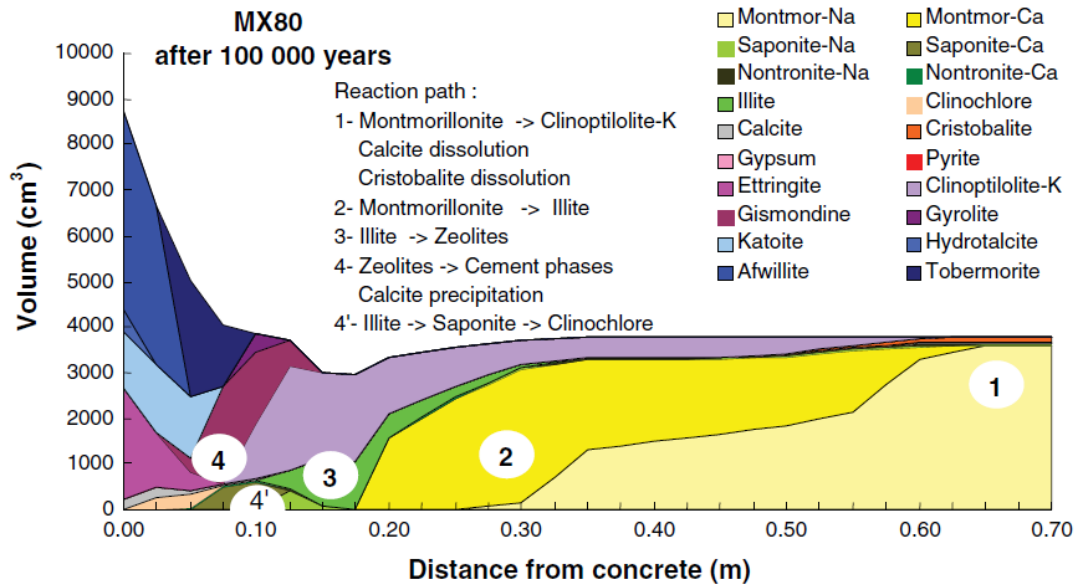
図 3.1-33 解析モデル内の鉱物分布解析結果 (10<sup>5</sup>年後)

(電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 2005)

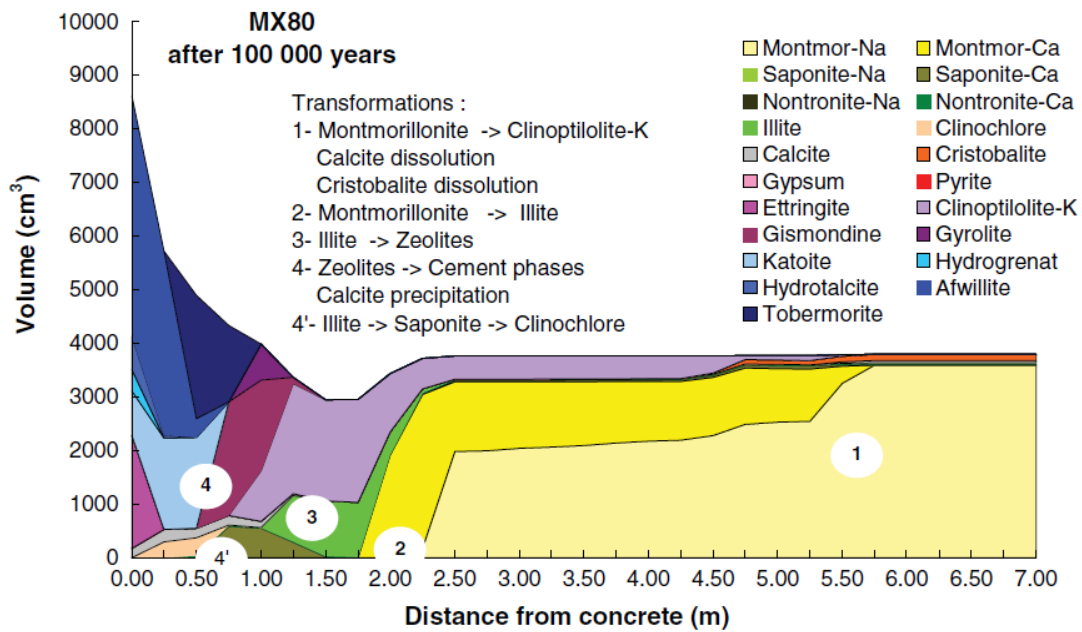
(準安定ゼオライト, 安定相 (安定ゼオライト, カリ長石) が生成する場合)

緩衝材中央部分に相当する二つの差分メッシュにおいて、105年経過後においても約80%のモンモリロナイトが残存している。図中のSiO<sub>2</sub>(CSH)とCa(OH)<sub>2</sub>(CSH)は杉山モデルで表したC-S-Hゲルの端成分を表す。なお、モンモリロナイト相量の初期値は1,450 mol/m<sup>3</sup>である。

Gaucher et al. (2004) は、PHREEQC を使用して、セメントから溶出する液相によるベントナイト (MX80) の変質を計算した。pH12.5 のセメント間隙水が実効拡散係数 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s および 10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>/s とする一定条件で接触し続けることで、随伴鉱物の溶解とともにゼオライトが生成し、併せて同箇所でも Na 型モンモリロナイトが Ca 型化すること、そしてスメクタイトがゼオライト化、イライト化すること、そして境界部分では C-S-H 状および C-A-S-H 状、エトリンガイトなどの二次鉱物相が析出することを解析により示した (図 3.1-34)。実効拡散係数が 10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>/s (圧密ベントナイト MX80 の拡散係数相当 (Lehikoinen et al., 1996)) から 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s に変わることによってアルカリ変質領域が約 10 倍に拡大することが示された。pH が 12.5 のセメント間隙水が実効拡散係数 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s の条件で 10<sup>5</sup> 年間ベントナイト層に接触した場合、表層から約 1m の範囲で Ca-Al-Si-H<sub>2</sub>O 系, Ca-Si-H<sub>2</sub>O 系 Ca-Al-SO<sub>3</sub> 系などの各種鉱物相が二次生成物として形成され、表層から深さ約 1.8~5.8 m の範囲で Ca 型モンモリロナイトの層が形成されることを示した (Gaucher et al., 2004)。



a 3. Mineralogical composition of the barrier after 100,000 years, diffusion coefficient =  $10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s.



b 6. Mineralogical composition of the barrier after 100,000 years, diffusion coefficient =  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s.

図 3.1-34 ベントナイト層のアルカリ変質に係る通水量の感度解析結果 (Gaucher et al., 2004)

(a : 実効拡散係数  $10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s, b : 実効拡散係数  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s)

## ②本検討で想定した環境条件および材料条件を考慮したベントナイト層のアルカリ影響に起因する状態変遷予測

第2次 TRU レポートにおけるベントナイト層のアルカリ変質影響に関する解析では、空隙率が低い花崗岩および堆積岩を母岩として想定している。いずれにおいても降水系地下水、透水係数  $1 \times 10^{-9}$  m/s、動水勾配 0.01 を想定しており、本検討で想定した地下水に係る諸条件と同じである。一方、本検討では、コンクリート部材が直接接触する埋め戻し材（表 3.1-3）を対象としたアルカリ変質の検討に限定するため、埋め戻し材の特性となる諸条件（母岩相当の透水係数、ベントナイト：掘削ズリ混合比=15：85）を考慮して変遷状態を推定する必要がある。

本検討で想定した埋め戻し材の透水係数（母岩相当= $1 \times 10^{-9}$  m/s）は、第2次 TRU レポートで評価対象とした緩衝材の透水係数（ $1 \times 10^{-11}$  m/s 以下）に比べて2桁以上高い値である。また、ベントナイト混合率は、本検討で想定した埋め戻し材、および第2次 TRU レポートで各々15%、70%である。これらの条件から、ベントナイト系材料の層がコンクリートに接触する端部における境界条件を同一とした場合、本検討で想定した埋め戻し材の方が、アルカリ変質がより大幅に進行すると考えられる。なお、Gaucher et al. (2004) の検討では、緩衝材の実効拡散係数を2桁大きくした場合に、生成する二次鉱物の種類および割合（変質過程）は同一であるが、変質領域の大きさが1桁大きくなることが示されている（図 3.1-34）。したがって、本検討における埋め戻し材の変質領域では、図 3.1-33 に示すようにモンモリロナイトの溶解に伴いカリ長石、ヒューランダイト、アナルサイム、セピオライトが二次鉱物として生成すると推察できるが、それらの二次鉱物が存在する範囲は、図 3.1-32 に示される緩衝材中央部から 50 cm あたりの界面領域の変質範囲に比べてかなり大きな範囲に拡大すると予想できる。さらに、埋め戻し材ではベントナイト混合率が大幅に低められていることなどの理由により、単純な置き換えが出来ないが、本検討における  $10^5$  年後の埋め戻し材の変質領域は、Gaucher et al. (2004) の検討で示される緩衝材の拡散係数を  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s とした場合の解析結果（図 3.1-34, 下図）に示される  $10^5$  年後の状態よりも、さらに深部までアルカリ変質領域が拡大すると予想できる。

### 3.1.4 処分システムを対象とした状態変遷の推定

#### (1) 初期状態の設定

セメント系材料としては、3.1.1-(1)に示すように、OPC を用いた。コンクリートの部材厚さおよび強度などの諸条件を、3.1.1-(3)に示した。また、ベントナイト系材料で構成される緩衝材、止水プラグ、そして埋め戻し材に対しては、セメント系材料による諸影響を受けない場合に長期安全性の観点からの要求機能（表 2.2-1）を満たせるよう、表 3.1-2 に示す設計条件を設定した。

地下施設は廃棄体を縦置きに設置する形態（図 3.1-2）とした。施工段階でベントナイト系材料（緩衝材、止水プラグ、埋め戻し材）に及ぼされる影響は、各施工段階において適切な対策（図 3.1-14～図 3.1-19）を講じることで回避できると考え、それらのベントナイト系材料が表 3.1-2 に示す設計条件を満たして施工された状態を初期状態として設定した。

## (2) 本検討で想定した環境条件下における変遷過程

前述の各部位の状態変遷の推定を基に、処分施設の構成で進展する状態変遷を推定する。連鎖的に進展する状態変遷の順番を以下に示す。

- ① 移流状態の地下水が、処分施設外周部のグラウト、ロックボルト、吹き付けコンクリート、および母岩に接する強度プラグ外周部でセメント硬化体の溶脱変質が発生、進行する。
- ② セメント硬化体の溶脱変質に伴い、浸出する高アルカリ成分が母岩に浸透し、アルカリ変質を生じさせる。その過程で堆積岩の空隙およびひび割れの中に C-S-H 状、濁沸石などの二次鉱物が沈殿する。
- ③ 支保コンクリートに発生した各種のひび割れを介して地下水が埋め戻し材に向かって浸透する。支保コンクリート中を浸透する過程で地下水はセメント溶脱成分を含むため、埋め戻し材、ならびに止水プラグのアルカリ変質が発生、進展する。
- ④ 支保コンクリート、インバートコンクリートおよび床版コンクリートに接触した地下水に含まれる高アルカリ成分が、それらのコンクリートと母岩の界面近傍を浸透する地下水流に乗り、緩衝材上部に接触するため、緩衝材上部にアルカリ変質が発生、進展させる。

本検討では、既往の検討事例 {(Atkinson, 1985), (Marty et al., 2009), (Wang et al., 2007)} における環境条件で設定された接触水量と比べて高い、第 2 次 TRU レポートに示される条件を設定している（動水勾配 0.01, 透水係数  $1 \times 10^{-9}$  m/s）。また、支保コンクリートの部材厚は、Atkinson (1985) の検討事例（半径 20 m）ならびに第 2 次 TRU レポートにおける検討事例（10 m）に比べて非常に薄く、Marty et al. (2009) (0.5 m), Wang et al. (2007) (0.7 m) の検討事例と同等の 500mm (0.5 m) としている。そこで既往の検討事例 {(電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 2005), (Atkinson, 1985), (Marty et al., 2009), (Wang et al., 2007)} などの解析で多く挙げられる指標値としての  $10^5$  年時点までに上記①～④の変質状態が各々進行、拡大し、以下の状態に推移すると推定した。

- ①' グラウト、ロックボルトのように非常に薄い部材厚さとなるセメント系材料は、早い時期に C-S-H 相の Ca/Si 比の低下ならびに pH 低下が生じる。本検討で想定した部材厚 500 mm の支保コンクリートも、母岩に接触する面、および支保コンクリー

トに発生した各種のひび割れ近傍において、同様に徐々に減肉化が進行し、C-S-H相のCa/Si比が著しく低下した後にペースト部が消失し、ほぼ骨材のみが残存する状態に至ると推定した。

- ①” 強度プラグは支保コンクリート、およびインバートコンクリート上の床版コンクリート面に接して打設されるが、支保コンクリートに比べて低水セメント比で高強度な設計とするため、上記①’に示す支保コンクリートに比べて溶脱変質フロントの進行速度は低下すると考えられる。そのため、C-S-HのCa/Si比の低下とpHの低下、そして骨材のみが残存する状態となる外周部の浸食速度は、支保コンクリートに比べて遅いと推測した。
- ②’ 上記①’の過程で地下水移流場に置かれるコンクリート部のpHの低下と併せて母岩の二次鉱物析出部のpHも低下するため、pHの低下に伴って不安定化するC-S-H類などの一部の二次鉱物は溶解挙動に転じ、多孔化による高透水領域が一定深さで坑道方向に沿って形成される。なお、一定量の地圧が坑道に向かって作用しているため、変位が生じることで坑道近傍に緩み域が形成される。

これらの判断を基に作成した状態変遷図を図 3.1-35 に示す。

### (3) 状態変遷図に基づく考察

本検討で想定した環境条件および施設構成とした場合、セメント系材料を用いた部材は部材の大きさ、ならびに地下水との接触割合の影響により、グラウト、ロックボルト定着材、支保コンクリート・インバート、床版コンクリート、そして強度プラグの順番で溶脱などの変質作用による部材厚の減少が生じる。そして、その変質の過程で支保・インバートコンクリート、床版コンクリートが接触する埋め戻し材、緩衝材上部が一定量アルカリ変質し、二次鉱物の生成と併せてベントナイトのCa型化が生じる。また、同時にそれらのコンクリート部材が接触する母岩界面近傍では、坑道方向に沿ってアルカリ変質した母岩の緩み域が形成され、卓越した移行経路が形成される。そして、力学プラグ近傍では、セメント量が多くなるために外周方向に向かって母岩の比較的広い範囲でアルカリ変質をもたらすと推定した。

本検討では、 $10^3$ 年、 $10^5$ 年とする時間軸に沿った評価は出来ないが、処分システムで生じる変遷過程を状態図（図 3.1-35）として表した。緩衝材上部近傍のインバート・床版コンクリートが骨材を残して消失する段階（状態-3）では、緩衝材上部のアルカリ変質と併せて、コンクリートの反力による緩衝材の形状を維持する作用も無くなるため、副次的に緩衝材上部の透水性が増加するものと推定できる。

この状態変遷図を基にすると、坑道方向に沿った移行経路が形成される可能性があるため、このような状態で緩衝材を介して放出される核種の移行を抑制する機能を維持するためには、止水プラグの機能維持が重要と指摘できる。止水プラグの機能維持期間をより長



くするための対策として、止水プラグと周辺コンクリートの体積比を見直す、支保工コンクリートおよび力学プラグ外周部の消失に伴う止水プラグ端部の流失を防ぐために止水プラグの形状を変更する、もしくは地下水中でも減肉しにくい部材を併用するなどの諸対策を検討する必要性が導き出される。

セメント系材料近傍で生じるアルカリ変質など、各種の変質現象の解明に係る研究の進展と併せて評価解析技術の精度が向上することで、上述の状態変遷図を介した施設構成の設定（仮設計）と安全確保のため設計見直しの繰り返し作業により、安全確保の確度が向上するものと考えられる。

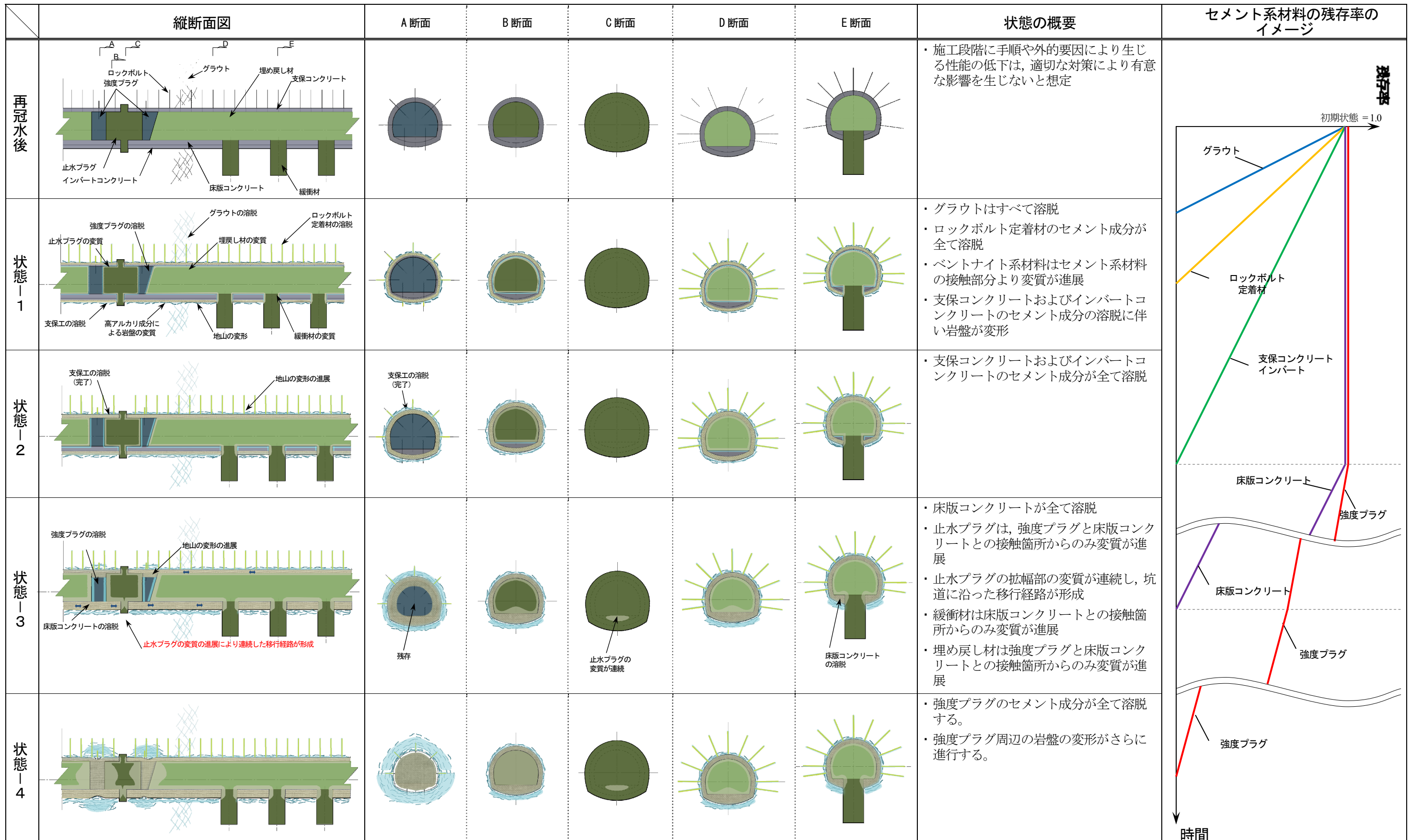


図 3.1-35 状態変遷図

#### (4) 地下水組成の違いとして海水系地下水を想定した場合の影響感度

本検討では、降水系地下水を前提として状態変遷を推定したが、ここでは、地下水組成の違いが状態変遷の過程に及ぼす影響について考察する。

塩分濃度の高い海水系地下水では、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Mg}^+$ などの影響により硬化体中の水和物の分解、そして細孔溶液の組成濃度の変化が生じる。NaCl を添加したモルタルでは、細孔溶液中の $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 濃度の上昇と併せて $\text{OH}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 濃度も上昇することが報告されている（例えば二村・福島，1990）。また、海水中でのセメント硬化体の変質現象として以下の知見がまとめられている。海水中の $\text{Mg}^{2+}$ と炭酸イオンにより、ブルーサイト ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) とアラゴナイト ( $\text{CaCO}_3$ ) が生成する（土木学会，2003）。カルサイトの代わりに準安定相であるアラゴナイトが生成するのは、 $\text{Mg}^{2+}$ がカルサイト表面に吸着することでカルサイトの結晶成長速度が抑制されるためである（笹木ほか，2002）。これらは、コンクリート表面を覆い、海水中ではイオンの移動を抑制し、さらなる浸食を防ぐ効果を持つ。これらに加えてマグネシウムケイ酸塩、セッコウ、エトリンサイト、カルサイト、ソーマサイトが生成する場合もある（土木学会，2003）。塩化物イオンが過剰に存在する条件では、エトリンサイトは非膨張性であると考えられている（土木学会，2003）。海水中でのエトリンサイトの生成は膨張やひび割れをもたらさないのが典型である。海水中での主な劣化は、C-S-H がマグネシウムケイ酸塩に変化することによる（土木学会，2003）。

第2次 TRU レポートでは、降水系地下水と海水系地下水の違いがコンクリートと接する母岩における変質状態ならびに高pHブルームの拡大状況に及ぼす影響を解析している。各地下水組成（表 3.1-5）の違いが、母岩における鉱物の消失および二次鉱物の生成過程、そして高 pH ブルームの拡大状況に比較的大きな影響を及ぼし、海水系地下水では、降水系地下水の場合に比べて母岩中の非晶質 Si の溶解量を高めること、そして周辺の pH をより高い状態にする傾向にあることが示されている（図 3.1-36～図 3.1-39）。

また、塩分濃度が高い海水系地下水では、コンクリートから溶脱する Ca 量が降水系地下水の場合に比べて多くなることから、降水系地下水の場合に比べて埋め戻し材の Ca 型化の進行量が高まり、Ca 型化フロントがより内部に進行すると推察できる。一方で、海水系地下水が埋め戻し材に浸透することによるベントナイトの膨潤圧が低下する影響も共存するため、降水系地下水の場合に比べて埋め戻し材外周部での膨潤圧低下領域が大きくなると推察できる。このように、海水系地下水の環境下では、緩衝材中の有効粘土密度を同一とした場合、降水系地下水の場合に比べて透水係数を高める傾向が認められる（図 3.1-40）。そのため、第2次 TRU レポートでは、海水系地下水となる環境下では、降水系地下水の場合に比べて緩衝材の有効粘土密度ならびに乾燥密度を高める仕様案を示している（表 3.1-6）。

以上の知見から、環境条件として海水系地下水を想定した場合、コンクリート部材から

放出される高アルカリ分量が増えるため、各ベントナイト系材料における低透水性を担保するためには、表 3.1-6 に示す有効粘土密度と乾燥密度をかなりの程度にまで高めることが必要となる可能性がある。

ベントナイト系材料に対してこのような条件を負荷させた場合を前提とした場合、降水系地下水における状態変遷の過程 (図 3.1-35) とほぼ同じ順番で進展すると考えられるが、①各コンクリート部材の溶脱変質の進行速度が早まること、②坑道近傍の母岩の多孔化領域がより大きくなること、③支保コンクリートおよび力学プラグに接する埋め戻し材および緩衝材上部の表層部においてモンモリロナイトの Ca 型化と各種鉱物相の溶解・二次鉱物生成の進行速度が早まることが推測できる。

表 3.1-5 第 2 次 TRU レポートの解析に使用する地下水組成 (核燃料サイクル機構, 1999b)

	降水系地下水 (レファレンスケース)	海水系地下水 <sup>*1</sup>
pH	8.5	8.0
Eh [mV]	-281	-303
単位: [mol l <sup>-1</sup> ]		
Na (Total)	$3.6 \times 10^{-3}$	$6.2 \times 10^{-1}$ <sup>*5</sup>
Ca (Total)	$1.1 \times 10^{-4}$	$3.3 \times 10^{-4}$
K (Total)	$6.2 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-2}$
Mg (Total)	$5.0 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-4}$
Fe (Total)	$9.7 \times 10^{-10}$	$3.9 \times 10^{-8}$
Al (Total)	$3.4 \times 10^{-7}$	$3.2 \times 10^{-9}$
C (Total)	$3.5 \times 10^{-3}$ <sup>*2</sup>	$3.5 \times 10^{-2}$ <sup>*6</sup>
S (Total)	$1.1 \times 10^{-4}$ <sup>*3</sup>	$3.0 \times 10^{-2}$ <sup>*7</sup>
B (Total)	$2.9 \times 10^{-4}$ <sup>*4</sup>	$1.7 \times 10^{-3}$ <sup>*4</sup>
P (Total)	$2.9 \times 10^{-6}$ <sup>*4</sup>	$2.6 \times 10^{-7}$ <sup>*4</sup>
F (Total)	$5.4 \times 10^{-5}$ <sup>*4</sup>	$1.0 \times 10^{-4}$ <sup>*4</sup>
Br (Total)	—	$5.3 \times 10^{-4}$ <sup>*4</sup>
I (Total)	—	$2.0 \times 10^{-4}$ <sup>*4</sup>
N (Total)	$2.3 \times 10^{-5}$ <sup>*4</sup>	$5.2 \times 10^{-3}$ <sup>*4</sup>
Cl (Total)	$1.5 \times 10^{-5}$ <sup>*5</sup>	$5.9 \times 10^{-1}$
Si (Total)	$3.4 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-4}$

\*1 海水を起源として、鉱物との平衡反応、有機物による還元反応を考慮したモデル地下水 (Yui et al., 1999a)

\*2 無機炭素 =  $3.5 \times 10^{-3}$  mol l<sup>-1</sup>, CH<sub>4</sub>(aq) =  $1.5 \times 10^{-10}$  mol l<sup>-1</sup>

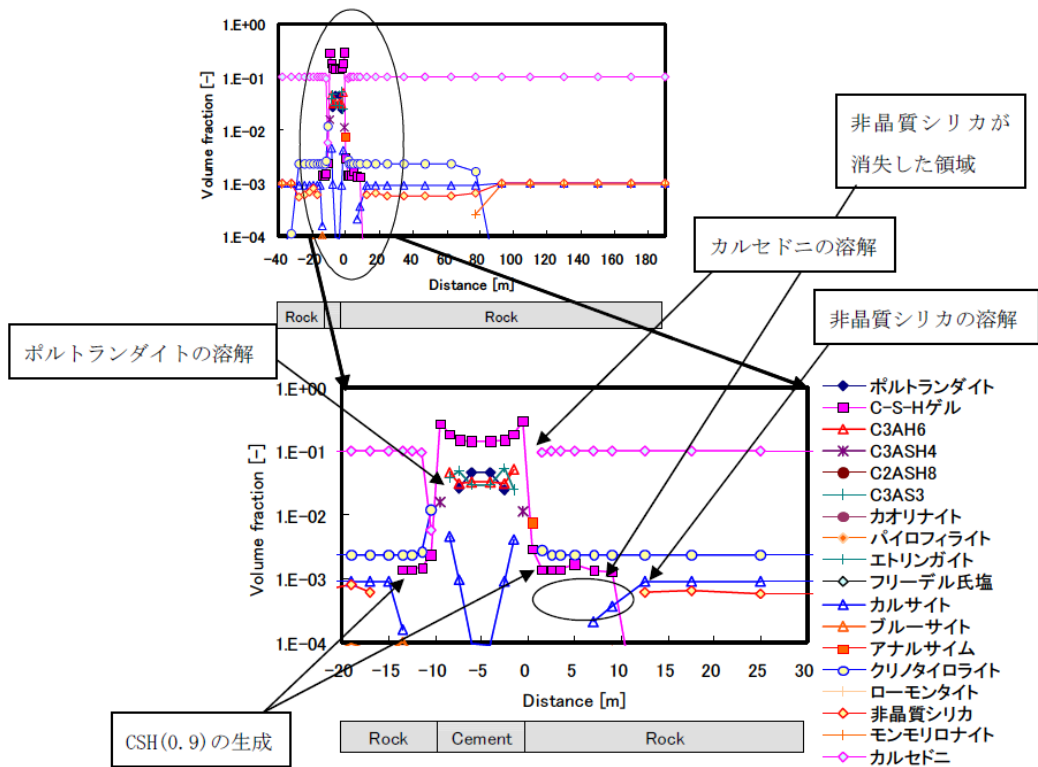
\*3 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> =  $1.1 \times 10^{-4}$  mol l<sup>-1</sup>, HS<sup>-</sup> =  $3.8 \times 10^{-9}$  mol l<sup>-1</sup>, H<sub>2</sub>S(aq) =  $1.2 \times 10^{-10}$  mol l<sup>-1</sup>

\*4 実測地下水の平均値より設定

\*5 電荷バランスをとるために調整

\*6 無機炭素 =  $1.5 \times 10^{-2}$  mol l<sup>-1</sup>, CH<sub>4</sub>(aq) =  $2.0 \times 10^{-2}$  mol l<sup>-1</sup>

\*7 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> =  $3.2 \times 10^{-5}$  mol l<sup>-1</sup>, HS<sup>-</sup> =  $2.8 \times 10^{-2}$  mol l<sup>-1</sup>, H<sub>2</sub>S(aq) =  $2.1 \times 10^{-3}$  mol l<sup>-1</sup>



注：C-S-Hゲルの表記はCSH(Ca/Si比)としている

図 3.1-36 降水系地下水条件における結晶質岩のアルカリ変質挙動解析結果（10,000年）

（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）

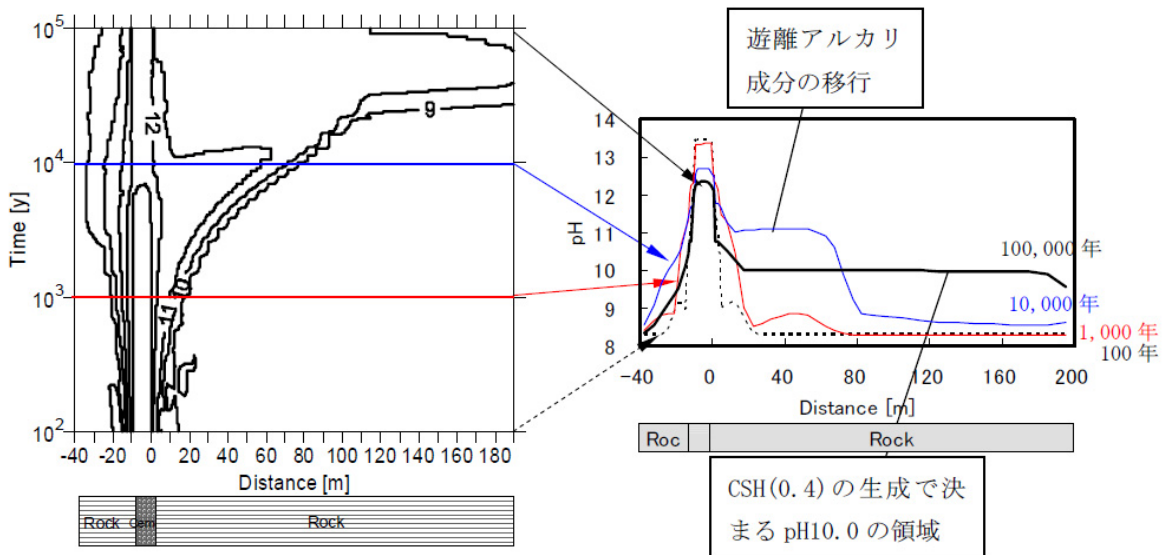
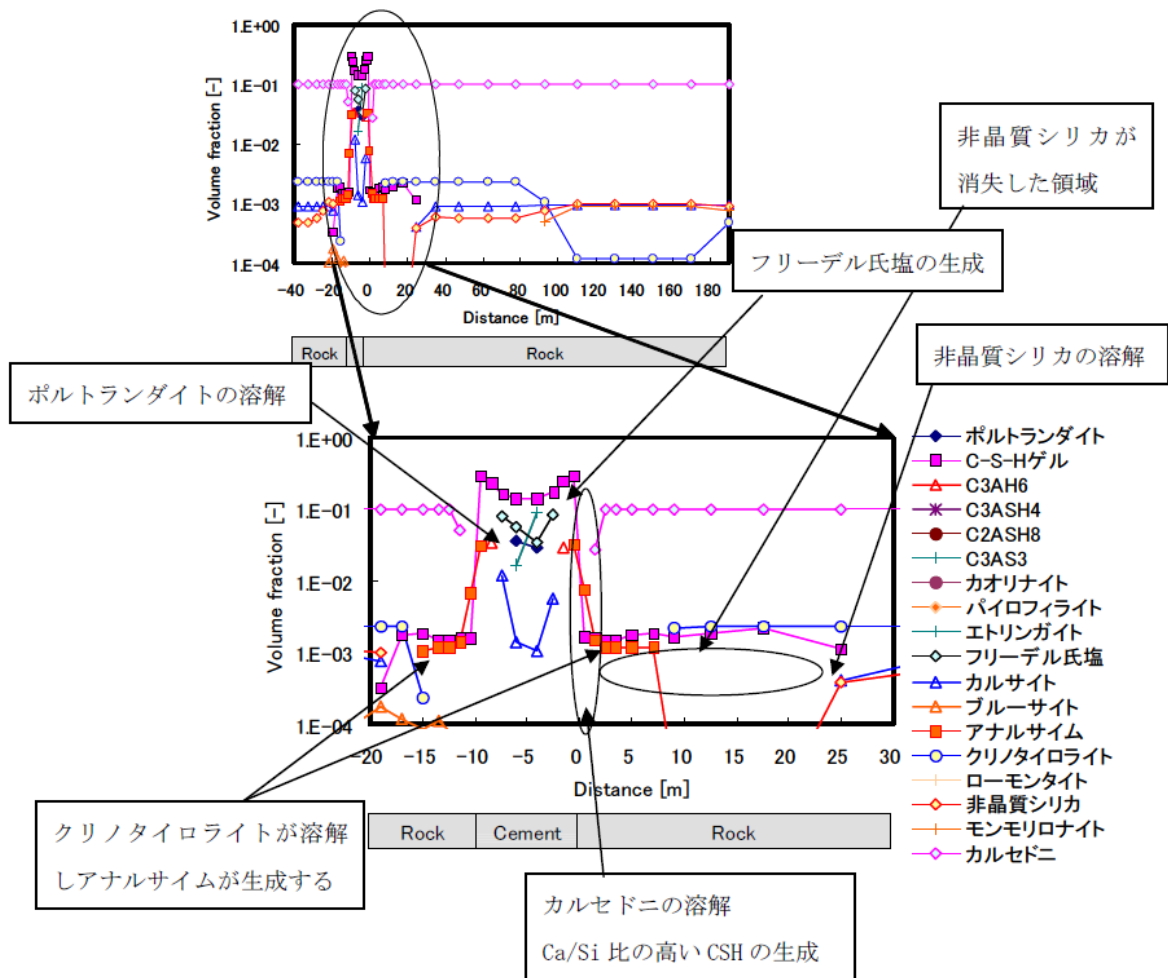


図 3.1-37 降水系地下水条件における結晶質岩中の高 pH プルームの拡大過程解析結果

（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）



注：C-S-Hゲルの表記はCSH(Ca/Si比)としている

図 3.1-38 海水系地下水条件における結晶質岩のアルカリ変質挙動解析結果（10,000年）

（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構，2005）

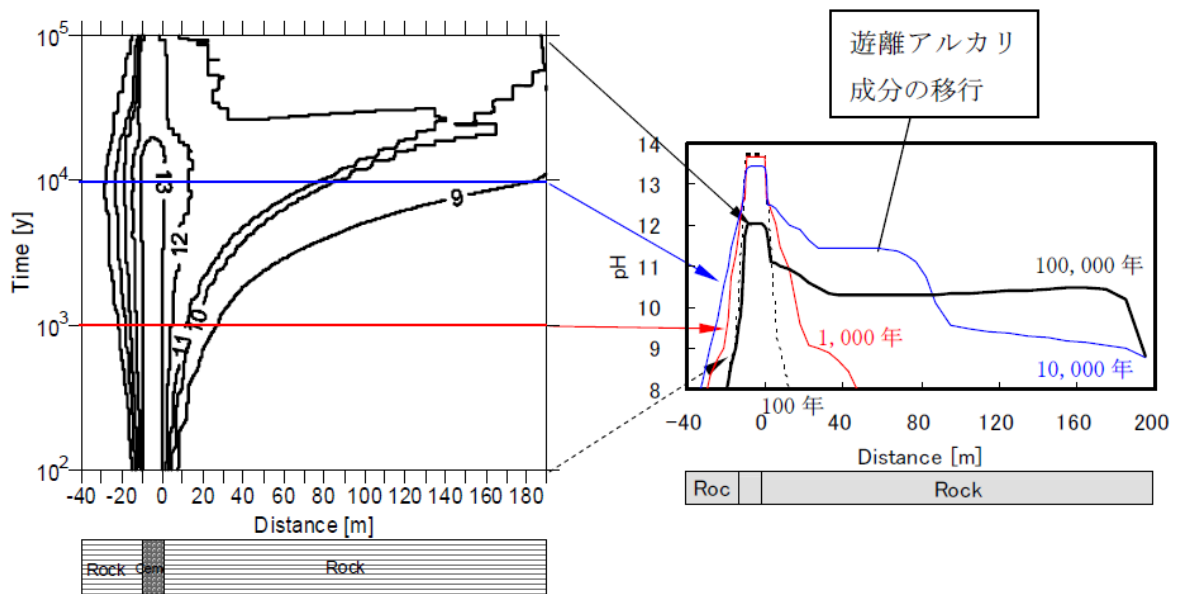


図 3.1-39 海水系地下水条件における結晶岩中の高 pH プルームの拡大過程解析結果  
(電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 2005)

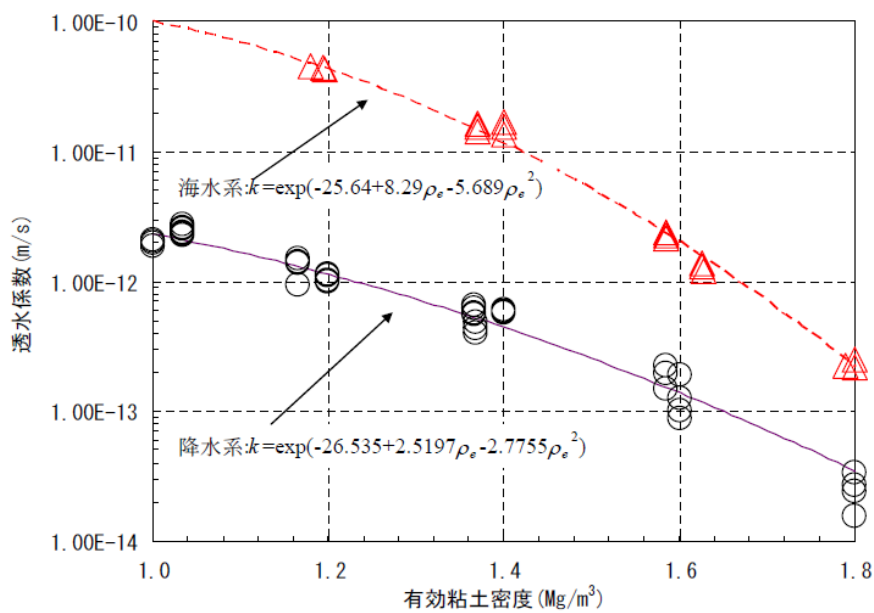


図 3.1-40 クニゲルV1の降水系／海水系地下水を通水した場合の有効粘土密度と透水係数の関係  
(電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 2005)



表 3.1-6 降水系／海水系地下水の違いに応じた緩衝材の仕様例  
(電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, 2005)

		底部	側部	頂部
降水系	厚さ(m)	1.2	1.0	
	有効粘土密度(Mg/m <sup>3</sup> )	1.36		
	乾燥密度(Mg/m <sup>3</sup> )	1.60	1.36	
	ケイ砂混合率(%)	30	0	
海水系	厚さ(m)	1.2	1.0	
	有効粘土密度(Mg/m <sup>3</sup> )	1.45		
	乾燥密度(Mg/m <sup>3</sup> )	1.60	1.45	
	ケイ砂混合率(%)	20	0	

注1：有効粘土密度の目標値は降水系地下水の場合 1.34Mg/m<sup>3</sup>以上, 海水系地下水の場合 1.42Mg/m<sup>3</sup>以上  
注2：底部には乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>以上の要件があるため, 底部のみ乾燥密度とケイ砂混合率を例示

### 3.2 状態変遷の推定に基づく各部位における要求特性の重要度の検討

#### 3.2.1 各部位における要求特性の重要度

本章では、2章で展開したセメント系材料を用いた各部位における影響事象の整理結果に基づき、処分施設全体における状態変遷の推定を試みた。本節では、状態変遷推定図を基にセメント系材料がもたらす影響要因と対処方法を整理し、対処すべき課題の重み付けを考察する。

##### (1) 処分システムの安全機能を確保するうえで重要な部位の特定

状態変遷図を作成することによって、処分システムを構成する部位の相対的な重要度を明確化することができる。3.1.4で示したように、セメント溶脱成分の影響により、坑道方向に沿った水みちが形成される可能性がある。この水みちは、核種の卓越的な移行経路となる可能性があるため、物理的にこれを分断する機能を有する止水プラグが安全確保上重要となることが指摘できる。

また、坑道方向に卓越した核種の移行経路の形成を避けるためには、止水プラグの機能を維持させることが重要となる。したがって、止水プラグに近接する強度プラグは、それ自体の変形による影響を止水プラグに与え、また、長期間にわたりセメント由来の高アルカリ成分による影響を与え続けるため、この重要性が併せて指摘できる。

処分システムの安全機能を確保するうえで重要な部位がある程度明確にできれば、この後の要求性能や影響要因の評価においても、重点的に対策を検討すべき項目を明らかとすることができる。すなわち、安全確保のための設計効率の向上や設計の合理化が可能になるものと考えられる。



## (2) 影響要因の重要度分類

状態変遷の推定においては、施設の各部位の状態変遷を組み合わせ、施設をシステムとしてとらえた変遷を推定することになる。すなわち、部材間の影響要因の相互作用を定量的に整理することになるため、影響低減策の重要度の比較が可能となる。なお、地下施設の部位ごとに生じると考えられる変遷とその影響事象に対する低減策の検討を2章で行った。2章では、閉鎖後長期においてセメント系材料を用いた各部材に生じる性能変化の一つとして、コンクリート部材に各種要因によるひび割れが発生し、その部材の透水性の増大ならびに剛性低下とともに、接触する他材料であるベントナイト系材料などの変形が生じると推察したが、その影響の大きさに関する検討事例は現存しない。そのため、3章では、閉鎖後長期においてセメント系材料の化学的変質を起源とする影響要因に着目し、状態変遷過程を検討した。

今回の状態変遷の推定図では、システムの安全機能を保持するために重要な部位である止水プラグと緩衝材の性能は、それぞれ強度プラグと支保工・床版コンクリート・インバートコンクリートとの接触部からセメントに起因する影響が及ぶことによって変化する。図 3.1-35 に示した状態変遷の推定の結果によれば、緩衝材の変質は長期にわたって上部の一部領域のみに留まるとしている。この事象をさらに詳細に考察した結果を以下に示す。

グラウトは比較的早期に溶脱により消失し、それ以降、周辺材料に影響を与えない。また、床版コンクリートおよび支保・インバートコンクリートが全て溶脱し、骨材のみが残存すると設定しているにもかかわらず、緩衝材に及ぼす物理・化学的な影響は限定的であるとしている。一方、強度プラグはセメント系材料の中では最も長く残存し、長期にわたり周辺材料に影響を与え続ける。したがって、強度プラグのセメント影響に着目することの重要性がより高いと考えられる。

このため、強度プラグの変質を精度よく評価する観点から、その溶脱特性の把握がより重要になると判断できる。この例では、強度プラグの要求特性での対応、すなわち「高緻密性」および「低溶解度の水和物相」に重点を置けば良いと考えられる。さらに、性能評価の観点からは、その影響の不確実性の把握も重要な課題である。強度プラグは長期間にわたり影響を与え続けることから、その影響の程度の不確実性が施設全体の性能評価の不確実性に大きく影響するものと考えられる。したがって、強度プラグに関して、これに適用する候補材料の影響評価における不確実性への感度を把握したうえで、適用材料を選択することが新たな要求事項として導出できると考えられる。

### 3.2.2 状態変遷の推定における留意点

状態変遷図の作成において、変質の進展の程度（例えば、変質深さ）や時期を定量的に示すためには、サイト特性に依存した環境条件の設定が重要になる。施設の状態の変遷を大きく左右する要因の一つとしては、地下水の組成の設定（降水系/塩水系）が挙げられる。今回の状態変遷図の作成においては、セメント系材料、ベントナイト系材料の変質に係る知見が多い降水系地下水を前提としたが、海水系地下水の場合の知見も整理することでセメント系材料の溶脱特性が変化する可能性とその要因を抽出した。3.1.4(3)で示したように、OPC 硬化体では、水和物相中で構成割合が高いポルトランドイト（水酸化カルシウム）の溶解度は高くなる。しかし、その一方で接水面での二次鉱物の析出による膜効果と併せて、硬化体間隙水の pH が初期の状態の Na, K に起因して高いために塩水系地下水から Cl は浸透するが、Na, K が浸透しづらくなり、ポルトランドイトの分解に伴う Ca の溶脱が起こりにくくなる可能性がある。

現状では、3.1.4(4)で示した結果に対して海水系地下水条件で施設の変遷がより進む方向となるか否かを定量的に示すことはできないが、判断の方向に大きな影響を及ぼすと考えられる。今後は、サイト特性に依存した評価精度の向上に資するための知見を充実させるべきである。

### 3.3 3章のまとめ

地下施設と周辺岩盤で構成される処分施設全体系の状態変遷を既往の知見で示される解析結果などを基に推定した。本検討では、縦置き型の処分施設を想定し、環境条件を堆積岩、深度 500m、動水勾配 0.01 の降水系地下水として設定した。なお、使用するセメントの種類（OPC）、坑道断面径および支保コンクリートの部材厚などの施設構成は、「地層処分研究開発第2次取りまとめ」に示される情報を引用した。ベントナイト系材料および母岩に対するセメントによるアルカリ影響に係る既往の知見としての解析結果を参考として処分坑道周辺を対象としたシステムの状態変遷を推定し、状態変遷図を作成した。作成した状態変遷図を基に、システムの安全機能への影響を定性的に評価することにより、要求特性の重要度を推定することができた。

### 第3章 参考文献

- Atkinson, A. (1985): The time dependence of pH within a repository for radioactive waste disposal, AERE-R11777, UKAEA.
- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 (2005) : TRU 廃棄物処分技術検討書一第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ一, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02.
- 土木学会 (2003) : コンクリートの化学的浸食・溶脱に関する研究の現状, コンクリート委員会化学的浸食・溶脱研究小委員会 (323 委員会) 報告, コンクリート技術シリーズ.
- 藤田朝雄, 杉田 裕 (1998) : JNC/AECL 共同研究-トンネルシーリング性能試験の現況について-, JNC TN1340 98-001.
- Gaucher, E.C., Blanc, P., Matray, J., M., Michau, N. (2004): Modeling diffusion of alkaline plume in a clay barrier, Applied Geochemistry, Vol.19, pp.1505-1515.
- 原子力発電環境整備機構 (2004) : 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性一「処分場の概要」の説明資料一, NUMO TR-04-01.
- 核燃料サイクル開発機構 (1999a) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性一地層処分研究開発第2次取りまとめ, 分冊2, JNC TN1400 99-022.
- 核燃料サイクル開発機構 (1999b) : 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一地層処分研究開発第2次取りまとめ一分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023.
- 株式会社 ケー・エフ・シー (2013) : ドライモルタルカタログ, <http://www.kfc-net.co.jp/SNdrymortar.htm>, 2013年6月時点.
- Lehikoinen, J., Carlsson, T., Muurinen, A., Olin, M., Salonen, P. (1996): Evaluation of factors affecting diffusion in compacted bentonite, Mat. Res. Soc. Symposium. Proc., Vol.412, pp.675-682.
- Marty, N.C.M., Tournassat, C., Burnol, A., Giffaut, E., Gaucher, E., D. (2009): Influence of reaction kinetics and mesh refinement on the numerical modeling of concrete/clay interaction, Journal of hydrology, vol.364, pp.58-72.
- 二村誠二, 福島正人 (1990) : 塩素イオンがアルカリシリカ反応に及ぼす影響, コンクリート工学年次論報告文集, Vol.12 No.1, pp.789-794.

- 日本原子力研究開発機構 (2009) : 平成 20 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 地下坑道施工技術高度化開発報告書.
- 日本原子力研究開発機構 (2010) : 高レベル放射性廃棄物処分施設における坑道支保工に用いるセメント系材料の低減化技術に関する研究(共同研究), JAEA-Research 2010-057.
- 笹本広, 油井三和, 内藤守正, 藤崎淳, 高瀬博康 (2009) : 地層処分におけるグラウト技術の高度化開発 (その 11) -グラウト影響評価技術の開発-, 土木学会第 64 回年次学術講演会, CS5-011.
- 笹木圭子, 山下和彦, 恒川昌美 (2002) : 常温におけるホタテ貝殻焼成物からのアラゴナイトの合成と FE-SEM によるそれらの形態特性, 資源と素材:資源・素材学会誌, Vol.118, No.8, pp.553-558.
- 内田善久, 蓮本清二, 小熊登, 神藤健一 (2006) : ダム基礎グラウチングの完了基準に関する実験的研究, 土木学会論文集 F, Vol.62 NO.3, pp.531-545.
- Wang, L., Jacques, D., Cannière, D., P.. (2007): Effect of an alkaline plume on the Boom Clay as a potential host formation for geological disposal of radioactive waste, SCK・CEN-ER-28 external report.

## 4 まとめ

廃棄体を縦置き定置する地下施設構成を想定し、建設・作業時にセメント系材料に求められる機能と特性の抽出・整理と閉鎖後長期におけるセメント系材料の変質・劣化による処分坑道周辺全体系の状態変遷の推定を行った。そして、それらの検討を通じたセメント系材料に求められる検討課題の優先度づけを試行した。本検討で得られた成果を以下に示す。

### (1) セメント系材料の要求機能と要求特性の抽出・整理

既存の施工技術等の知見を基に、建設・作業時に坑道内における作業上の安全性確保に求められる条件を要求機能として部位毎に設定した。また、その建設・作業時の要求機能を満たすための要求特性の導出とともに、セメント系材料が周辺環境（ベントナイト系材料および母岩）に及ぼす物理・化学的影響に関する既往の知見を基に長期安全性確保のために必要と考えられる要求特性を部位毎に抽出・整理した。

### (2) 地下施設全体系の長期状態変遷過程の推定による試行的課題抽出

堆積岩中に処分施設を構築することを想定し、セメント硬化体ならびに周辺環境に及ぼす化学的影響に関する既往の知見で示された複数の評価結果を統合解釈することで処分システム全体系の状態変遷過程を推定した。そして、長期安全確保のために長期状態変遷推定精度の向上と長期変質を考慮に入れた設計への反映が力学プラグおよび緩衝材上部近傍の支保工・床版コンクリートに求められる等、優先的に課題解決が必要となる部位を抽出した。

なお、状態変遷の推定は、サイト特性に依存するため、サイト特性に応じたセメント系材料の長期挙動を把握するための知見を充実することが必要である。

# 用語集

## 【ア行】

### インバートコンクリート

坑道底部の逆アーチ部分に設置するコンクリート製の覆工部分を指す。地質が不良な場合などにトンネルの両側側壁基部の間を逆アーチで結合して、覆工コンクリート閉合断面として耐力を増加させ、沈下・変状を防止する。

### エントラップトエア

コンクリートの練混ぜ中に自然に混入する気泡であり、孔径はおよそ  $50\mu\text{m}$ ～ $10\text{mm}$  である。

### エントレインドエア

高性能 AE 減水剤、AE 減水剤などに添加される AE 剤の表面活性作用によってコンクリート中に積極的に導入された微細な独立した気泡であり、孔径はおよそ  $50\mu\text{m}$ ～ $1\text{mm}$  である。

### 埋め戻し材

坑道の掘削により影響を受けた領域を空間として放置しておくこと、地圧の作用により坑道の力学的安定性が損なわれたり、地下水の卓越した水みちとなるなど、処分場全体のバリア性能に有意な影響を及ぼすことが想定される。このような影響を排除するために、処分のために掘削した坑道や立坑(地上施設と地下施設を結ぶトンネル)などを埋めるもの。材料としては粘土などが考えられている。

### オートラジオグラム（放射線写真法）

放射線化合物が付着した物体、もしくは放射線を出す物質（放射性物質）を X 線フィルムに密着させて感光させ、フィルムに生じた黒化部位の位置から基の放射性物質の存在部位を確認する。コンクリートおよび岩石に本分析手法を応用する場合、存在する空隙の多さに相関して黒化程度が高くなる。

### オーバーパック

ガラス固化体を封入する容器をいう。ガラス固化体に地下水が接触することを防止し、

地圧などの外力からガラス固化体を保護する。人工バリアの構成要素の一つで、材料としては鉄などが考えられている。

## 【カ行】

### 概要調査

三段階のサイト選定段階のうち、二段階目の精密調査地区選定のための調査 (Preliminary Investigation)。ボーリング調査、地表踏査、物理探査などの地上からの調査が行われる。

### 概要調査地区

概要調査を実施する地区。文献調査結果に基づき、NUMO が選定する。

### 緩衝材

人工バリアの構成要素の一つで、候補材料はベントナイトなどの粘土。オーバーパックと岩盤の間に充填し、地下水の浸入や放射性物質の移動を抑制するものをいう。さらに岩盤の変位を物理的に緩衝するクッションの働きや、地下水の水質を化学的に緩衝して変化を抑える働きを持つ。

### 掘削影響領域 (EDZ : Excavated Disturbed Zone)

岩盤が、掘削の影響を受け、初期の性質から変化している領域をいう。破壊特性や変形特性などの力学特性、透水係数などの水理特性、あるいは空気の侵入により地下水の酸化還元電位などの地球化学特性が変化することが想定される。

### グラウト

地盤や構築物の間隙・割れ目・空洞に対して、止水や弱部の補強を目的として固結材を注入する工法。注入材にはセメント、粘土、水ガラス系の薬液などがあり、セメントは強度や経済性の点で優れ、広く用いられている。

### ゲル空隙

セメントに含まれる構成物質相のうち主にエーライト、およびビーライトの水和反応の進展によって生じる C-S-H 相の生成に伴って発生する空隙であり、孔径は 1~3nm 程度と



されている。この空隙中の水は水和物相表面に強く吸着されているので、空隙中に存在する水は普通の水と異なり、凍結温度は非常に低く、またセメントの未反応成分とは通常の条件では反応しない。

### ゲル浸透クロマトグラフィー (Gel Permeation Chromatography)

主に高分子の分子の大きさ（分子量）の差に基づいて分離を行う液体クロマトグラフィーの一種であり、分子量分布、および平均分子量分布を測定する手法である。分析対象とする高分子の大きさと同程度の細孔を有する粒状ゲルを充填したカラムに試料溶液を注入すると、分子量の高い分子（大きな分子）ほど粒状ゲル表面の細孔への浸透（permeation）が少なく、分子量の低い分子（小さな分子）に比べて短い時間でカラム中を移動して溶出する。検出時間が短い分子ほど、検液中で低分子量の物質として相対的に評価される。

### 原位置締め固め方式

緩衝材の施工方法の一つで、原位置において、振動ローラーなどの機械を用いて土質系材料にエネルギーを与えることで、材料を締め固めて密度を増大させる方法をいう。

### 建設・操業・閉鎖

建設は、廃棄体定置のための地下施設（坑道群）と地上施設を構築することをいう。操業は廃棄体の受け入れに始まり、オーバーパックへの封入や廃棄体パッケージ、緩衝材などの製作、これらの搬送・定置、その後に行う処分坑道の埋め戻しまでの一連の作業をいう。閉鎖は、連絡坑道、アクセス坑道の埋め戻しをいう。

### 高性能 AE 減水剤

所要のコンクリート流動性（例えば、管理指標としてのスランプ）を得るために必要な単位水量を大幅に減少させることができる、もしくは単位水量を変えずにスランプを大幅に増加させることができる。また、AE 剤の機能により空気連行性をもち、一般的に使用される AE 減水剤よりも高い減水性能および良好なスランプ保持性能をもつ化学混和剤である。

### 構造躯体

第二種特定放射性廃棄物を処分するに当たり、廃棄体や廃棄体パッケージの定置空間と

緩衝材などの設置空間を区画分けするものである。人工バリアの種類や処分坑道の形状を踏まえ、鉄筋コンクリート製や鋼製など適切な部材で構成する。

## 高レベル放射性廃棄物

再処理の過程において使用済燃料から分離される高レベル放射性廃液またはそれを固化したガラス固化体をいうが、一般には後者の意味でガラス固化体を指して用いられることが多い。なお、諸外国の中には使用済燃料を再処理しない方針の国もあり、その場合には使用済燃料自体が高レベル放射性廃棄物となる。本報告書では、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」における「第一種特定放射性廃棄物」という語の代わりに「高レベル放射性廃棄物」を用いている。「第一種特定放射性廃棄物」には、海外再処理により発生する TRU 廃棄物を一定の基準に基づき交換され返還されるガラス固化体も含まれる。

## 高炉スラグ微粉末

高炉で銑鉄を作る際に発生する副産物で、高温熔融状態にある高炉スラグを水や空気により急冷した非晶質物質を粉砕した微粉末をさす。非晶質のカルシウム成分を多く含み、潜在水硬性を有するため、フライアッシュおよびシリカフェームのようなポズラン物質とは異なる材料である。

## 【サ行】

### 再冠水

廃棄体の定置後、地下水が周辺岩盤から埋め戻し材や緩衝材などに浸潤し飽和する。この地下水により飽和状態になる過程を再冠水という。再冠水の期間（再冠水時間）やその状態を把握することは、廃棄体定置後のニアフィールド周辺の長期の状態変遷を理解する上で重要である。

### サイト選定／サイト選定段階

概要調査地区、精密調査地区、処分施設建設地を順次選定する段階を総称して、サイト選定段階という。

### 自己シール性

緩衝材の特性の一つで、地下水の浸入に伴う膨潤によって、周辺岩盤との隙間や緩衝材

内に生じた隙間を充填する特性をいう。

## 支保工

支保工は、坑道の掘削に伴って力学的に不安定となる坑道周辺の岩盤を施工中から完成後にわたって安定に保ち、掘削作業の安全と完成後の坑道の安全な供用を確保するために設置される構造物をいう。支保部材としては、吹付コンクリート、覆工コンクリート、コンクリートセグメント、ロックボルト、鋼製支保工などが一般的であり、単独あるいは組み合わせて用いられる。

## 収着

人工バリア材、天然バリアなどの固相と間隙水などの液相との界面において、間隙水中に溶存する溶質が固相へ吸着、吸収される現象を収着という。収着性が高い溶質は固相への移行率が高く、間隙水中の濃度が低下する。放射性核種の収着性は固相と液相との収着分配係数 ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) として評価される。

## 充填材

廃棄体パッケージの中および構造躯体内の廃棄体以外の隙間を埋める材料およびその部位のことをいう。セメント系材料などを検討している。操業期間中は万一の汚染拡大防止、処分場閉鎖後は長期間にわたって放射性物質が容易に漏れ出ないようにする機能を期待することもある。

## 処分坑道

廃棄体と廃棄体に応じた人工バリアを定置する坑道のことをいう。

## 処分場

地層処分に必要な人工バリアを含む一群の施設（処分施設）と天然の地層（天然バリア）によって構成され、閉鎖後長期間にわたって高レベル放射性廃棄物などを人間環境から安全に隔離するための機能を持つシステムをいう。従って処分場は、閉鎖までに必要な一群の施設と閉鎖後長期にわたる安全機能が期待される構成要素すべてを総称したものをいう。閉鎖後の長期にわたる安全機能に着目し、一つのシステムとして表現する際には、多重バリアシステムという。

## 処分パネル

高レベル放射性廃棄物を埋設するための処分坑道群とそれを取り囲む坑道からなる一つの区画をいう。

## シリカフェーム

アーク式電気炉などで金属シリコンやフェロシリコンを精錬する際の排気ガス中に浮遊する平均粒径  $0.1\mu\text{m}$  程度の微細な球状粒子で、電気集塵機により捕集される。非晶質のケイ素を多く含み、高いポズラン反応性を有する。我が国では近年、同種の精錬工場が稼働していないため、副産物として得ることが出来ず、海外、特に北欧からの輸入に依存するため、高強度コンクリートの製造が必要な場合等、特殊な目的での用途に限られる。

## 人工バリア

生活環境への放射性廃棄物の漏出を防止、および低減するために設けられる人工構築物をいう。高レベル放射性廃棄物の場合、ガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材からなる。地層処分低レベル放射性廃棄物のハル・エンドピースの場合は、充填材、緩衝材および埋め戻し材からなる。また、廃棄体や構造躯体であっても、セメント系材料などを利用する場合には、収着などの機能を期待できる可能性があると考えられる。多重バリアシステムの構成要素の一つ。

## 精密調査地区

精密調査を実施する地区。概要調査結果に基づき、NUMO が選定する。

## 全面腐食

金属材料表面が均一に腐食する状態。一般に腐食速度が小さい時や金属表面を保護性皮膜で覆わない時に生じる。オーバーパック表面に局部腐食が発生しない条件で、オーバーパックの材料選定や厚さ設定に際して全面腐食の速度が重要な条件の一つとなる。

## 増粘剤

コンクリート中の骨材がセメントペースト成分と分離することを防止し、水中施工やポンプ圧送などの場合に添加されることが多い。

## 【夕行】

### 堆積岩

海底や河床などに運ばれた泥や砂などの堆積物や、火山噴出物などが固まってできた岩石（例：砂岩、泥岩）をいう。

### 第2次 TRU レポート

TRU 廃棄物処分の事業ならびに制度化に資するため、電気事業者などと JNC が協力し、2000 年に取りまとめた「TRU 廃棄物処分概念検討書（第1次 TRU レポート）」以降、両者が進めてきた研究開発の最新の成果を反映し、当該廃棄物処分の技術的成立性および安全性の見通しについてより確かなものとするを目的に、2005 年に関係機関の協力を得て取りまとめたものである。正式名称：TRU 廃棄物処分技術検討書—第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—

### 第2次取りまとめ

1997 年 4 月に公表された原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会報告書「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発などの今後の進め方について」に従い、関連する研究機関などの協力を得て、JNC が 1999 年 11 月に公開した報告書をいう。正式名称：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—

### 多孔質媒体

岩盤中の地下水や地下水中の物質の移動を考える上での岩盤の分類の一つをいう。多孔質の岩盤は粒子や間隙からなり、透水性や貯留性は間隙の大きさと量に依存する。新第三紀の堆積岩がこれに相当する。一般には亀裂性媒体と対語をなす。

### 多重バリアシステム

放射性廃棄物を、長期間にわたり生物圏から隔離し、放射性物質の移動を抑えることにより、処分された放射性廃棄物による影響が、将来にわたって人間とその環境に及ばないようにするための多層の防護系から成るシステムをいう。工学技術により設けられる人工バリアと、天然の地層である天然バリアにより構成される。

## 断層破碎帯

断層の活動に伴い、岩石が破碎され、不規則な割れ目の集合体となったもので、角礫部、ガウジ部などから構成される、ある幅を持った帯をいう。

## 地下施設

廃棄体を地上から地下に搬送するためのアクセス坑道や連絡坑道、廃棄体を埋設するための処分坑道と処分孔などをいう。

## 地質環境／地質環境特性

地層処分の観点から見た地下の環境を地質環境という。地質・地質構造、岩盤の性状・力学特性、地下水の地球化学特性、地下水の流動特性などが含まれ、これらの特性を総称し、地質環境特性という。

## 地上施設

ガラス固化体受入・封入・検査施設、緩衝材製作・検査施設、管理棟など、地下での建設や操業から閉鎖までに必要な地上の施設をいう。地下施設の閉鎖後は撤去されるが、閉鎖後管理が行われる場合、その間は必要な施設が残される。

## 地層

狭義には、堆積岩などの成層構造をなした岩体に限定して「地層」と呼ぶが、ここでは成因や構成要素を限定せず、地層処分において考慮される一定の広がりや深さを持った地層および岩体を含む意味で用いる。

## 地層処分システム

閉鎖後長期の安全性を評価する上で対象となるシステム全体の総称。一般に多重バリアシステム（または処分場）に人間環境（生物圏）が含まれる。

## 地層処分低レベル放射性廃棄物

TRU 廃棄物の中には、長期間にわたり環境に影響を及ぼすおそれがあるため、高レベル放射性廃棄物と同様に深い地層へ処分する必要のある廃棄物があり、「特定放射性廃棄物の

最終処分に関する法律」では「第二種特定放射性廃棄物」と特定されている。本報告書では、この「第二種特定放射性廃棄物」という語の代わりに「地層処分低レベル放射性廃棄物」を用いている。

### 低アルカリ性セメント

その浸出液の pH が最大でも 11.0 程度のセメントをいう。現在国内で市販されているセメント系材料（普通ポルトランドセメント）の pH は約 12.5～13.0 の高アルカリ性を示し、これを処分場において使用した場合、地下水の pH を上昇させることが想定される。この場合、ニアフィールドのバリア機能に有意な影響を及ぼす可能性があり、この影響を低減するためには、セメント系材料の pH を 11.0 程度にすることが必要であるといわれている。このような背景から、低アルカリ性セメントの開発とその適用性が検討されている。

### 定置

オーバーパックに封入したガラス固化体、廃棄体パッケージや緩衝材などを処分坑道内の所定の位置に据えることをいう。

### 低レベル放射性廃棄物

わが国では、放射性廃棄物は高レベル放射性廃棄物と低レベル放射性廃棄物に区分される。低レベル放射性廃棄物は高レベル放射性廃棄物以外の放射性廃棄物の総称である。

### 天然バリア

処分された廃棄物と人間の生活環境との間にある地層などをいい、天然のものではあるが、廃棄物が人間の生活環境に影響を及ぼさないようにする障壁としての役割も期待される。多重バリアシステムの構成要素の一つ。

### 閉じ込め

放射性核種の放出を防止する、または放出を最少限に抑制するための処分施設の設計を意味する。閉じ込めは、人工バリアまたは人工バリアとサイトの地質環境によって提供される。通常は、廃棄物が地層処分システムに対して悪影響を与え得る熱エネルギーを生じる期間、あるいは、放射能の減衰によって廃棄物に起因する危険性が十分に低減するまでの期間において、閉じ込めを提供するように地層処分システムの設計がなされる。

## 【ナ行】

### ニアフィールド

人工バリアと、その設置などにより影響を受けると考えられる人工バリア近傍の岩盤とを合わせた領域をいう。

## 【ハ行】

### 不確実性

天然現象には偶然的要素に支配される側面もあり、現象の理解の程度や定義のあいまいさなどから、これに基づくモデルやデータには必然的に結果を確実に予測できない面があり、不確実性を有する。放射性廃棄物処分の性能評価では取り扱う現象が多岐にわたり、空間的規模や時間的領域が広範にわたるため、必要とされる精度のレベルも個々の解析に応じて異なると考えられ、不確実性についても十分考慮しておく必要がある。

### 普通ポルトランドセメント

建築・土木構造物などに最もよく使用されているセメントであり、珪酸三カルシウム、珪酸二カルシウム、カルシウムアルミネート、カルシウムアルミノフェライト、硫酸カルシウムなどを成分に含む。普通ポルトランドセメントの浸出液の pH は約 12.5～13.0 と高アルカリ性を呈することから、ニアフィールドのバリア機能に有意な影響を及ぼす可能性がある。そのため、低アルカリ性セメントの開発とその適用性が検討されている。

### フライアッシュ

石炭火力発電所において石炭を燃焼する際に生じる灰の一種であり、ボイラー底部に落下する石炭灰以外のもので、主に電気集塵機で収集される飛灰を指す。コンクリート用混和材としては、JIS A6201 にその品質が規定されている。非晶質のケイ素成分を多く含み、我が国では、代表的なポゾラン物質として扱われている。

### プラグ

坑道の間中部や端部をふさぐために設置される構造物。埋め戻し材や緩衝材の移動や流出を防いだり、水の通りやすい経路を分断したり、不用意な人間侵入を防ぐ目的で設置される。



## プレグラウチング

切羽前方のグラウト注入領域に掘削前にグラウチングを施工すること。

## ブロック方式

緩衝材の施工方法の一つで、ブロック型の圧縮成形体を製作し、地下施設で成形体を組み上げて緩衝材を施工する方法をいう。

## 文献調査

文献そのほかの資料（記録文書、学術論文、空中写真、地質図など）から得られたデータに基づく分析・解析作業をいう。

## ベントナイト

モンモリロナイトという鉱物を主成分とする粘土の一種で、緩衝材の主要材料。ベントナイトは、その層間に入っている交換性の陽イオンの違いによって二つのタイプに分類される。ナトリウムイオンが入っているものをナトリウム型ベントナイト（膨潤型）、カルシウムイオンの場合はカルシウム型ベントナイト（非膨潤型）という。カルシウム型ベントナイトは、ナトリウム型ベントナイトに比べ層間結合が比較的強いいため水が浸潤しにくい膨潤性能は劣る。

## 【マ行】

### 無筋コンクリート

鉄筋を使用しないコンクリートの総称であり、力学的に鋼材で補強されていないため、使用部位および配合設計、使用材料に留意する必要がある。

### 毛細管空隙

セメントと水を混ぜた後に練混ぜ水に占められていた空間のうち、セメントの水和反応によって生成したカルシウムシリケート相（C-S-H）等の生成物によって埋められていない部分の空隙を指す。セメントの水和反応およびフライアッシュによるポゾラン反応の進行、もしくは水セメント比の低下によって毛細管空隙量は減少する。

## 【ラ行】

### レディーミクストコンクリート

整備されたコンクリート製造設備を有する工場で練混ぜを完了し、運搬車によって固まらない状態で工事現場（コンクリート打設現場）に運送されるコンクリートである。品質の規定に関しては、JIS A5308 が定められており、製品の標準化が図られている。

## 【A～Z 行】

### C-S-H

セメントの主要構成物質であるエーライト ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , 通称  $\text{C}_3\text{S}$ )、およびビーライト ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , 通称  $\text{C}_2\text{S}$ ) が水と接した時に Ca/Si 比が 1.2～2.0 程度となるカルシウムシリケート化合物と水酸化カルシウムを生成する。このカルシウムシリケート化合物の略称が C-S-H である。

### EPMA（電子プローブマイクロアナライザー）

電子線を物質の表面に照射すると、電子と物質との相互作用の結果、特性 X 線、反射電子、二次電子等の各種量子が発生する。これらの量子は物質の性質を示す情報の媒体である。その中で主に特性 X 線（波長あるいはエネルギー）を検出し、物質がどのような元素 ( ${}^4\text{Be}\sim{}^{92}\text{U}$ ) から、どこ ( $1\mu\text{m}$  程度の位置精度) に、どれだけ (0.001～100%) 構成されているか、またその微小領域から広領域を、非破壊で形状観察・元素分析する装置である。

# 付録

—有効単位表面積あたりのセメント使用量計算書—

部位：支保コンクリート

■数量算出根拠

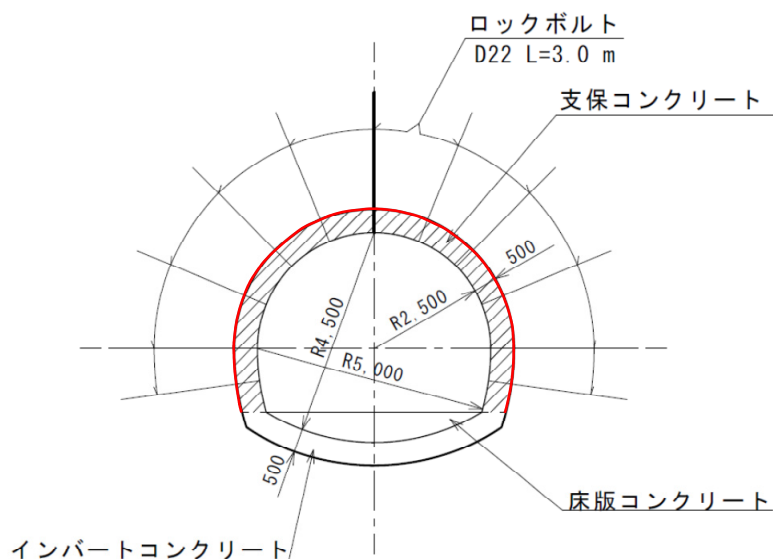


図 支保コンクリート数量算出対象位置

数量の算出にあたっては、Jw\_cad Version 7.03<sup>\*</sup>を用いた。

➤ 坑道単位長さ当たりの体積

上図のハッチ部分が該当しその面積は、 $5.70 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$

➤ 坑道単位長さ当たりの有効単位表面積

上図の赤色で着色した部分が該当しその延長は、 $12.18 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1}$

➤ 有効単位表面積あたりセメント使用量の算出

表 3.1-3 より、単位セメント使用量は  $400 \text{ kg m}^{-3}$  であるから、坑道単位長さ当たりのセメント使用量は、

$$5.70 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \times 400 \text{ kg m}^{-3} = 2280 \text{ kg m}^{-1}$$

従って、有効単位表面積あたりセメント使用量は、

$$2280 \text{ kg m}^{-1} \div 12.18 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1} = 187 \text{ kg m}^{-2}$$

※参考 URL : <http://www.jwcad.net/>

部位：インバート

■数量算出根拠

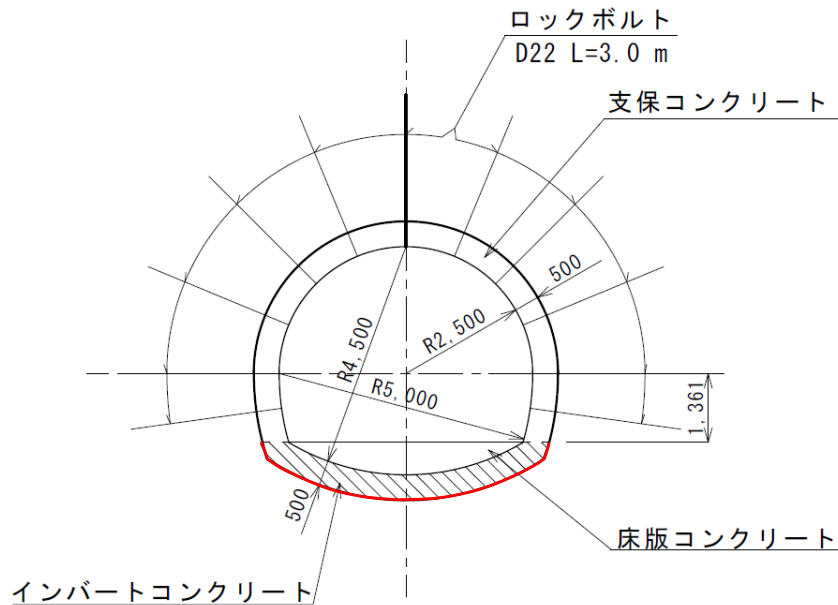


図 インバート数量算出対象位置

数量の算出にあたっては、Jw\_cad Version 7.03<sup>※</sup>を用いた。

- 坑道単位長さ当たりの体積

上図のハッチ部分が該当しその面積は、 $2.83 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$

- 坑道単位長さ当たりの有効単位表面積

上図の赤色で着色した部分が該当しその延長は、 $6.46 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1}$

- 有効単位表面積あたりセメント使用量の算出

表 3.1-3 より、単位セメント使用量は  $400 \text{ kg m}^{-3}$  であるから、坑道単位長さ当たりのセメント使用量は、

$$2.83 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \times 400 \text{ kg m}^{-3} = 1132 \text{ kg m}^{-1}$$

従って、有効単位表面積あたりセメント使用量は、

$$1132 \text{ kg m}^{-1} \div 6.46 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1} = 175 \text{ kg m}^{-2}$$

※参考 URL : <http://www.jwcad.net/>

部位：ロックボルト定着材

■数量算出根拠

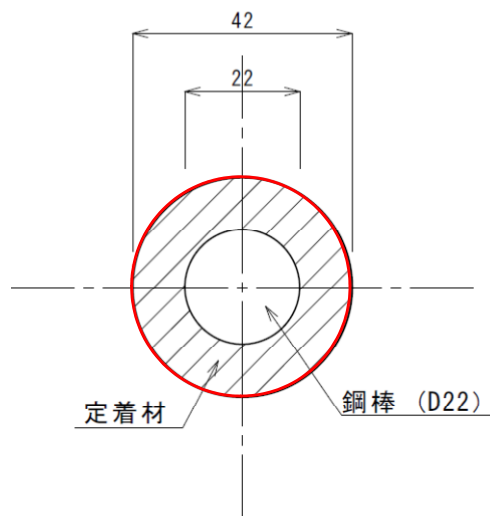


図 ロックボルト定着材数量算出対象位置

➤ 単位長さ当たりの体積

上図のハッチ部分が該当しその面積は、

$$\pi/4 \times (42^2 - 22^2) \times 10^{-6} = 1.01 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$$

➤ 単位長さ当たりの有効単位表面積

上図の赤色で着色した部分が該当しその延長は、

$$\pi \times 42 \times 10^{-3} = 0.13 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1}$$

➤ 有効単位表面積あたりセメント使用量の算出

表 3.1-3 より、単位セメント使用量は  $900 \text{ kg m}^{-3}$  であるから、単位長さ当たりのセメント使用量は、

$$1.01 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \times 900 \text{ kg m}^{-3} = 9.09 \times 10^{-1} \text{ kg m}^{-1}$$

従って、有効単位表面積あたりセメント使用量は、

$$9.09 \times 10^{-1} \text{ kg m}^{-1} \div 0.13 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1} = 6.99 \text{ kg m}^{-2}$$

部位：床版コンクリート

■数量算出根拠

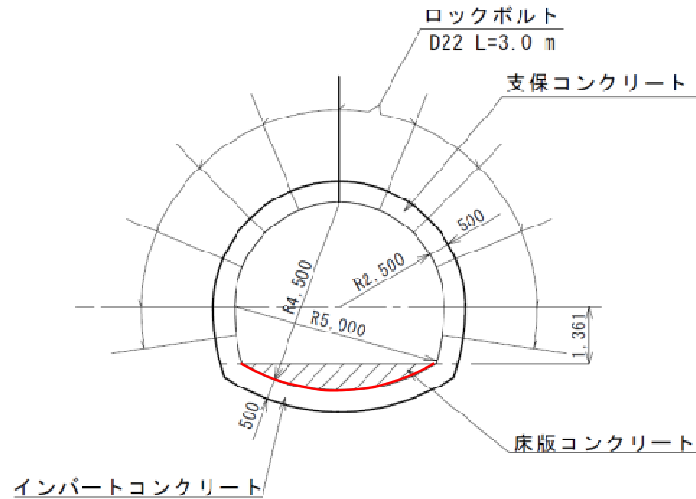


図 床版コンクリート数量算出対象位置

数量の算出にあたっては、Jw\_cad Version 7.03※を用いた。

- 坑道単位長さ当たりの体積

上図のハッチ部分が該当しその面積は、 $2.00 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1}$

- 坑道単位長さ当たりの有効単位表面積

上図の赤色で着色した部分が該当しその延長は、 $4.85 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1}$

- 有効単位表面積あたりセメント使用量の算出

表 3.1-3 より、単位セメント使用量は  $400 \text{ kg m}^{-3}$  であるから、坑道単位長さ当たりのセメント使用量は、

$$2.00 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \times 400 \text{ kg m}^{-3} = 800 \text{ kg m}^{-1}$$

従って、有効単位表面積あたりセメント使用量は、

$$800 \text{ kg m}^{-1} \div 4.85 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1} = 165 \text{ kg m}^{-2}$$

※参考 URL : <http://www.jwcad.net/>

部位：強度プラグ（連絡坑側）

■数量算出根拠

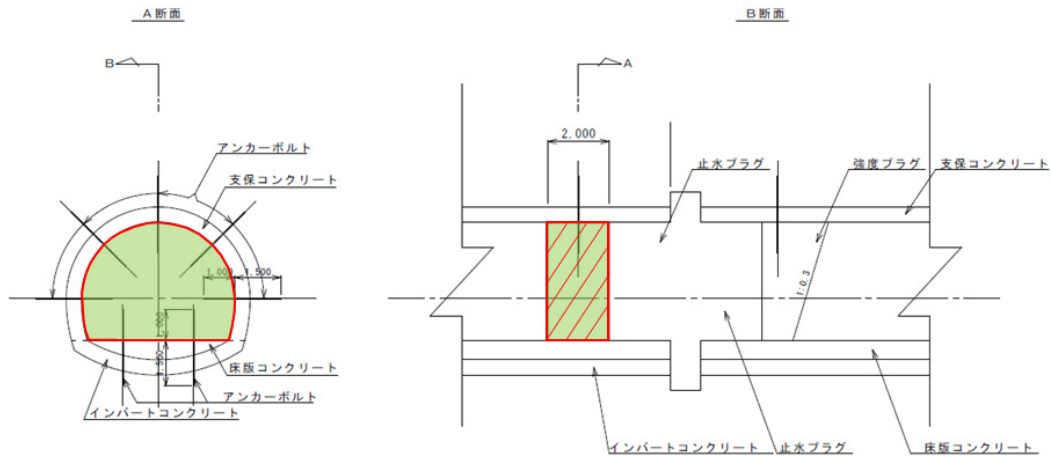


図 強度プラグ数量算出対象位置

数量の算出にあたっては、Jw\_cad Version 7.03\*を用いた。

➤ 強度プラグ（連絡坑道側）の体積

上図の緑色部分が該当しその断面積は、 $16.453 \text{ m}^2$

延長は2.0 m であるのでその体積は、

$$16.453 \text{ m}^2 \times 2.0 \text{ m} = 32.9 \text{ m}^3$$

➤ 外側表面積

上の左側の断面図の赤色で着色した部分が該当しその延長は、 $15.233 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1}$

強度プラグ（連絡坑側）の延長は、2.0 m であるので有効表面積は、

$$15.233 \text{ m}^2 \text{ m}^{-1} \times 2.0 \text{ m} = 30.47 \text{ m}^2$$

➤ 有効単位表面積あたりセメント使用量の算出

表 3.1-3 より、単位セメント使用量は  $400 \text{ kg m}^{-3}$  であるから、強度プラグ（連絡坑側）のセメント使用量は、

$$32.9 \text{ m}^3 \times 400 \text{ kg m}^{-3} = 13160 \text{ kg}$$

従って、有効単位表面積あたりセメント使用量は、

$$13160 \text{ kg} \div 30.47 \text{ m}^2 = 432 \text{ kg m}^{-2}$$

※参考 URL : <http://www.jwcad.net/>



部位：グラウト

■数量算出根拠

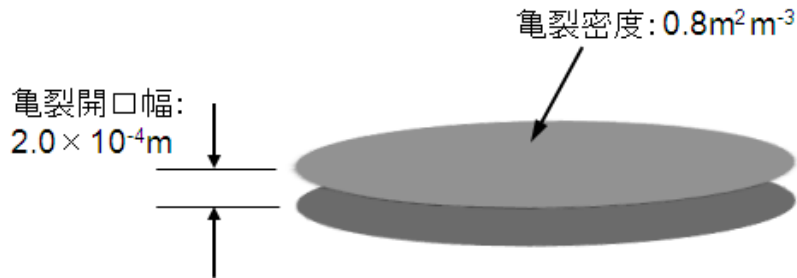


図 亀裂密度（面積）および亀裂開口幅

➤ 充填されるグラウトの体積

・ 第2次取りまとめにおいて設定された3次元亀裂密度は、 $0.8 \text{ m}^2/\text{m}^3$

・ 亀裂開口幅の標準正規変量の平均値は、 $2.0 \times 10^{-4} \text{ m}$

従って、グラウトが充填される体積は、

$$0.8 \text{ m}^2/\text{m}^3 \times 2.0 \times 10^{-4} \text{ m} = 1.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$$

➤ 外側表面積

上図の上下面がグラウトと岩盤の界面であるから有効表面積は、

$$0.8 \text{ m}^2/\text{m}^3 \times 2 = 1.6 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

➤ 単位体積当たりのセメント使用量の算出

充填されたグラウトの水セメント比を0.4とし、セメントの比重を3.0とすると、セメント  $1 \text{ m}^3$  に対する水の重量は、

$$3.0 \text{ Mg}/\text{m}^3 \times 1.0 \text{ m}^3 \times 0.4 = 1.2 \text{ Mg}$$

従って、セメント  $1 \text{ m}^3$  に対する水の体積は水の比重を1.0として、 $1.2 \text{ m}^3$

これらから、充填されたグラウト  $1 \text{ m}^3$  あたりのセメント量は、

$$3.0 \text{ Mg} \times 1.0 / (1.0 + 1.2) = 1360 \text{ kg}$$

➤ 有効単位表面積あたりセメント使用量の算出

グラウトが充填される体積は、 $1.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$  であるから、

有効単位表面積あたりセメント使用量は、

$$1360 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 1.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3 \div 1.6 \text{ m}^2/\text{m}^3 = 0.136 \text{ kg}/\text{m}^2$$