

# 幌延深地層研究計画における 低アルカリ性セメントの適用性に関する研究 (委託研究)

Study on Applicability of Low Alkaline Cement in Horonobe Underground  
Research Laboratory Project(Contract Research)

松田 武\* 納多 勝\* 入矢 桂史郎\* 小西 一寛\*  
中山 雅 小林 保之

Takeshi MATSUDA\*, Masaru NODA\*, Keishiro IRIYA\*, Kazuhiro KONISHI\*,  
Masashi NAKAYAMA, and Yasushi KOBAYASHI

地層処分研究開発部門  
堆積岩工学技術開発グループ

Sedimentary Environment Engineering Group  
Geological Isolation Research and Development Directorate

July 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメントの適用性に関する研究  
(委託研究)

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット  
松田 武<sup>\*1</sup>, 納多 勝<sup>\*1</sup>, 入矢 桂史郎<sup>\*2</sup>, 小西 一寛<sup>\*2</sup>, 中山 雅, 小林 保之<sup>+</sup>

(2007年12月12日受理)

幌延深地層研究センターでは平成17年度に地下施設の建設を開始し、坑道の一部において低アルカリ性セメント(HFSC)を用いたコンクリートの施工性確認試験(原位置試験)を実施することを計画している。そのため事前にHFSCが実工事での施工に耐えうる性能を持つことを確認する必要があり、平成18年度は、これまでに得られた知見に基づき、平成20年度以降に実施を予定している。地下施設内での低アルカリ性コンクリート施工試験の詳細な計画を検討するとともに、平成16年度に開始したHFSCを用いたコンクリート材料の長期間の密封浸漬試験の供試体について、浸漬液のpH測定および成分分析ならびに固相の成分分析を行い、pH低下挙動を把握した。

また、HFSCを用いた低アルカリ性コンクリート施工試験計画に関しては、HFSC424N(普通ポルトランドセメント:シリカフューム:フライアッシュ=40:20:40 wt.%)を吹付けコンクリートとして使用することを前提とした原位置試験計画を検討した。原位置試験の目的は、HFSCを用いたコンクリートが実際の地質環境中で地下空洞の支保材料として適用可能であるとの実証と実際の地質環境中に設置した低アルカリ性コンクリート支保材料が、その周辺の地質環境に与える影響を把握する手法および影響を評価する手法の構築である。

原位置試験の実施場所は、140m水平坑道で、地層は声間層である。試験期間は10年程度を目安とし、普通コンクリート支保工との比較が可能な計画とした。

また、現地で調達する材料を使用した場合もその強度を満足できることを確認するため、平成17年度に選定した配合に基づき、現地調達の細骨材・粗骨材を使用してベースコンクリートを作製するとともに、その強度試験などを実施した。

---

本報告書は、株式会社大林組が、日本原子力研究開発機構との契約により平成18年度に実施した成果に関するものである。

幌延深地層研究センター(駐在) : 〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432-2

\*1 株式会社大林組 土木技術本部技術第四部

\*2 株式会社大林組 技術研究所土木材料研究室

+ 地層処分基盤研究ユニット

Study on Applicability of Low Alkaline Cement in Horonobe Underground Research  
Laboratory Project  
(Contract Research)

Takeshi MATSUDA \*1, Masaru NODA\*1, Keishiro IRIYA\*2,  
Kazuhiro KONISHI\*2, Masashi NAKAYAMA and Yasushi KOBAYASHI<sup>+</sup>

Horonobe Underground Research Unit  
Geological Isolation Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received December 12, 2007)

In Horonobe Underground Research Center, construction of underground facility began in 2005 and in-situ experiment using the low alkaline cement: HFSC (Highly Fly-ash contained Silica-fume Cement) is planned in a part of the gallery.

Before the experiment will be constructed in the gallery, it is necessary to check that the HFSC has performance as tunnel support under the actual construction. The main work in 2007 is making a detailed plan of the in-situ experiment, that is scheduled after 2008 and laboratory tests on lowering behavior of pH in the HFSC concrete were conducted.

On the construction practicality experiment with low alkaline concrete, HFSC in-situ experiment plan was studied in case using HSFC424N as shotcrete. The aims of the experiment are the validation in applicability of low alkaline concrete as a support member for underground opening in the realistic geological environment and building the method to evaluate influence to the surrounding geological environment.

The location of the in-situ test is in the connection tunnel of a depth of 140m and the geology is the Koetoi formation. The period of the test is approximately 10 years. The test plan was designed to be able to make a comparison with Ordinary Portland Cement.

As it is necessary to confirm the strength property of the HFSC concrete with materials procured at construction site, strength of the base concrete using local procured fine aggregate and coarse aggregate based on the result of the selection of mix proportion in 2005 research was checked.

---

This work was performed by Obayashi Corporation under contract with Japan Atomic Energy Agency.

\*1 Civil Engineering Technology Division, Obayashi Corporation

\*2 Technical Research Institute, Obayashi Corporation

<sup>+</sup> Geological Isolation Research Unit

On laboratory tests on lowering behavior of pH in HFSC concrete, the pH of immersion fluid was measured and components of the immersion fluid and the solid phase were analyzed using test specimens in a long-term immersion test which had been continued since 2005.

Keywords: Geological Disposal, HLW, HFSC, pH Behavior, In-situ Experiment

This is a blank page.

## 目次

1.はじめに .....	1
2.背景と目的.....	2
3.HFSCを用いた低アルカリ性コンクリート施工計画の検討.....	4
3.1 HFSCを用いた低アルカリ性コンクリート施工試験計画の検討 .....	4
3.1.1 目的 .....	4
3.1.2 試験項目と確認事項 .....	4
3.1.3 実施場所の選定 .....	5
3.1.4 予備試験 .....	8
3.1.5 施工性確認試験 .....	14
3.1.6 支保工としての性能確認試験 .....	17
3.1.7 吹付けコンクリートおよび周辺岩盤の化学的影響確認試験 .....	24
3.2 コンクリートが周辺地質環境へ与える影響の評価手法の構築 .....	44
3.2.1 コンクリートが周辺地質環境へ与える影響の評価のためのモデル化の考え方や手 法などの整理.....	44
3.2.2 本原位置試験の地質環境を対象としたモデル化手法などの適用性と課題.....	53
3.3 ベースコンクリートの配合選定試験 .....	58
3.3.1 目的 .....	58
3.3.2 使用材料の物性確認 .....	59
3.3.3 試験方法 .....	60
3.3.4 試験項目 .....	61
3.3.5 試験ケース .....	61
3.3.6 試験結果 .....	62
3.4 急結剤を添加したモルタルの急結性状試験 .....	66
3.4.1 試験目的 .....	66
3.4.2 試験項目 .....	66
3.4.3 試験ケース .....	67
3.4.4 試験結果 .....	67
3.5 吹付け用コンクリートに適した配合 .....	69
4. HFSCを用いたコンクリート材料のpH低下挙動の把握 .....	71
4.1 目的 .....	71
4.2 試験方法 .....	71
4.2.1 試料作製 .....	71
4.2.2 浸漬および保管方法(継続).....	71
4.3 試験項目 .....	72
4.3.1 固相の分析方法 .....	73
4.3.2 液相の分析方法 .....	73

4.4 試験ケース .....	73
4.5 試験結果 .....	73
4.5.1 固相分析 .....	73
4.5.2 液相分析 .....	79
5.まとめ .....	81
参考文献 .....	83
付録 1 .....	85
付録 2 .....	111

Contents

4.3 Items of experiments.....	72
4.3.1 Analytical method of the solid phase.....	73
4.3.2 Analytical method of the liquid phase.....	73
4.4 Cases of experiments.....	73
4.5 Results of experiments.....	73
4.5.1 Solid phase.....	73
4.5.2 Liquid phase .....	79
5. Conclusions .....	81
References .....	83
Appendix 1.....	85
Appendix 2.....	111

## 表目次

表 3.1-1 各年度の試験項目と確認事項 .....	5
表 3.1-2 HFSCに使用する材料.....	8
表 3.1-3 HFSCに使用する材料.....	8
表 3.1-4 ベースコンクリートの配合 .....	9
表 3.1-5 検討配合.....	10
表 3.1-6 フレッシュコンクリートに関する試験項目と試験方法.....	10
表 3.1-7 硬化コンクリートに関する試験項目と試験方法.....	10
表 3.1-8 主要な試験の仕様機械 .....	11
表 3.1-9 フレッシュコンクリートに関する試験項目と試験方法（再掲） .....	12
表 3.1-10 吹付け性状（施工性）に関する試験項目と試験方法 .....	13
表 3.1-11 パネル型枠の最小寸法 .....	13
表 3.1-12 硬化コンクリートに関する試験項目と試験方法.....	13
表 3.1-13 施工性評価基準.....	14
表 3.1-14 硬化コンクリートに関する試験項目と試験方法.....	16
表 3.1-15 コンクリート応力計の仕様の例 .....	18
表 3.1-16 変位測定器の仕様の例 .....	20
表 3.1-17 溶接ゲージの仕様の例 .....	21
表 3.1-18 ロックボルト軸力計の仕様の例.....	22
表 3.1-19 地中変位計の仕様の例 .....	23
表 3.1-20 計測一覧表 .....	26
表 3.1-21 吹付時における計測項目.....	27
表 3.1-22 湿式分析における各種分析 .....	29
表 3.1-23 コアドリル仕様表 .....	33
表 3.1-24 吹付け部分の化学特性評価モニタリングにおける計測項目 .....	33
表 3.1-25 周辺地質・地質環境モニタリングにおける計測項目 .....	34
表 3.1-26 水質分析測定項目（案） .....	35
表 3.1-27 測定機器一覧 .....	36
表 3.1-28 測定値の有効数字と最小表示桁数 .....	38
表 3.1-29 試錐機仕様表（YBM-05DA2） .....	42
表 3.1-30 試錐ポンプ仕様表（GP-5） .....	42
表 3.1-31 採水装置基本仕様（水質モニタリング対応型） .....	43
表 3.3-1 セメント材料 .....	59
表 3.3-2 骨材 .....	59
表 3.3-3 混和材料.....	60
表 3.3-4 結合材の混合割合 .....	60
表 3.3-5 フレッシュコンクリートに関する試験項目と試験方法.....	61

表 3.3-6 ベースコンクリートの配合選定試験における試験ケース .....	61
表 3.3-7 吹付け用ベースコンクリートの配合.....	62
表 3.3-8 専門家による吹付けコンクリートに適したフレッシュ性状評価.....	63
表 3.3-9 吹付け用ベースコンクリートの試験結果 .....	64
表 3.4-1 モルタル試験の要因と水準.....	67
表 3.4-2 プロクター貫入抵抗値.....	68
表 3.4-3 圧縮強度試験値.....	68
表 3.5-1 ベースコンクリートの性状比較.....	70
表 3.5-2 吹付けコンクリートに適したベースコンクリートの配合 .....	70
表 4.5-1 硬化体試料の定量結果 .....	76
表 4.5-2 硬化ペースト試料の化学分析結果 .....	77
表 4.5-3 養生水のpH測定および組成分析結果 .....	79

## 図目次

図 3.1-1 実施設計時の地下施設レイアウトに示す原位置試験の実施場所.....	6
図 3.1-2 140m水平坑道の水平断面図と坑道断面図(吹付けコンクリートの繊維補強範囲を含む) .....	7
図 3.1-3 急結剤添加装置の例.....	11
図 3.1-4 コンクリートポンプの例.....	11
図 3.1-5 パネル型枠を用いた試験施工図.....	12
図 3.1-6 パネル型枠.....	13
図 3.1-7 水平坑道の試験施工図.....	15
図 3.1-8 コア採取位置 .....	17
図 3.1-9 コアドリル .....	18
図 3.1-10 コンクリート応力計.....	19
図 3.1-11 コンクリート応力計の設置状況の例.....	19
図 3.1-12 コンクリートひずみ計の仕様と概観図の例.....	19
図 3.1-13 コンクリートひずみ計の設置状況の例 .....	19
図 3.1-14 コンクリート応力計とコンクリートひずみ計の設置位置 .....	20
図 3.1-15 変位測定器.....	21
図 3.1-16 内空変位側線 .....	21
図 3.1-17 溶接ゲージの設置方法.....	22
図 3.1-18 ロックボルト軸力計の設置状況.....	23
図 3.1-19 地中変位計 .....	24
図 3.1-20 地中変位計の設置状況 .....	24
図 3.1-21 化学的影響に関する概念図 .....	25
図 3.1-22 各試験におけるコア試料測定位置 .....	26
図 3.1-23 X線回折装置.....	27
図 3.1-24 走査型電子顕微鏡 .....	27
図 3.1-25 熱分析装置 .....	28
図 3.1-26 湿式分析における前処理のフロー .....	28
図 3.1-27 ICP-AES装置.....	29
図 3.1-28 間隙水抽出装置の概念図 .....	29
図 3.1-29 EPMA分析装置 .....	30
図 3.1-30 コンクリートコアによる中性化試験.....	31
図 3.1-31 水銀圧入型ポロシメータ .....	31
図 3.1-32 電気泳動ユニット .....	32
図 3.1-33 コアボーリング掘削概念図(鉛直掘削) .....	41
図 3.1-34 試錐機 .....	41
図 3.1-35 試錐ポンプ .....	41

図 3.1-36 トリプルコアバレル.....	41
図 3.1-37 採水装置概念図.....	43
図 3.2-1 コンクリートが周辺地質環境へ与える影響の評価の検討手順.....	45
図 3.2-2 安全性能への影響を定量化する 2 つのアプローチ .....	51
図 3.2-3 モデル化手法などの適用性と課題の検討の項目と本原位置試験の役割.....	54
図 3.3-1 ベースコンクリートのスランプ値の経時変化 .....	63
図 3.3-2 ベースコンクリートの圧縮強度の経時変化.....	65
図 3.3-3 ベースコンクリートの圧縮強度の経時変化.....	66
図 3.4-1 モルタルの成型状況.....	67
図 3.4-2 貫入抵抗試験状況 .....	67
図 3.4-3 急結剤添加モルタルの凝結特性.....	68
図 3.4-4 急結剤添加モルタルの強度特性.....	69
図 4.2-1 供試体の養生状況 .....	72
図 4.2-2 供試体の保管状況 .....	72
図 4.5-1 HFSC226 硬化ペースト試料のTG-DTAチャート .....	74
図 4.5-2 HFSC325 硬化ペースト試料のTG-DTAチャート .....	74
図 4.5-3 HFSC424 硬化ペースト試料のTG-DTAチャート .....	75
図 4.5-4 HFSC523 硬化ペースト試料のTG-DTAチャート .....	75
図 4.5-5 HFSC吹付け硬化ペースト試料のTG-DTAチャート .....	76
図 4.5-6 EPMAによるHFSC226 硬化体（材齢 1547 日）の元素分布測定結果 .....	77
図 4.5-7 EPMAによるHFSC325 硬化体（材齢 1547 日）の元素分布測定結果 .....	78
図 4.5-8 EPMAによるHFSC424 硬化体（材齢 1547 日）の元素分布測定結果 .....	78
図 4.5-9 EPMAによるHFSC523 硬化体（材齢 364 日）の元素分布測定結果 .....	78
図 4.5-10 EPMAによるHFSC吹付け硬化体（材齢 364 日）の元素分布測定結果.....	79
図 4.5-11 浸漬水のpH値の経時変化 .....	80

## 1. はじめに

日本原子力開発研究機構（以下、原子力機構）では、北海道幌延町において、堆積岩を対象とした幌延深地層研究計画を進めている。幌延深地層研究計画では、原位置試験の1つとして、坑道の一部において、原子力機構が開発した低アルカリ性セメント（Highly Fly-ash contained Silica-fume Cement, 以下、HFSC）を用いたコンクリートの施工性確認試験を計画<sup>1)</sup>している。

そのため、HFSCが施工に耐えうる性能を持つことを確認するために、平成17年度には地上に設置した模擬坑道にHFSC424（普通ポルトランドセメント（OPC）：シリカフューム（SF）：フライアッシュ（FA）=40:20:40 wt.%）を用いたコンクリートを吹付けて、施工性および設計強度を満足することを確認した<sup>2)</sup>。一方、セメント浸出液のpHが長期間にわたり11を超える場合には、緩衝材および岩盤が変質し所期の性能を発揮しない可能性があるため、HFSCを用いたコンクリートの施工後、浸出液のpHが11以下となる期間および緩衝材・岩盤への影響の有無について確認をしておく必要がある。

これまでに得られた知見に基づき、幌延地下施設内でのHFSCを用いた吹付けコンクリートの施工試験の詳細な計画を検討した。

HFSCをNATM工法で構築されるトンネル支保工に適用するために、幌延の地下施設建設工事で使用する材料を用いて、地下施設において要求される施工性状および28日材齢の設計基準強度36N/mm<sup>2</sup>を満足する硬化性状を満足する配合の検討を行った。また、pH低下挙動の把握のため、平成17年度までに浸漬した試料に対して分析を行い、残りの試料の浸漬を継続した。

## 2. 背景と目的

幌延深地層研究センターでは平成 17 年度に地下施設の建設を開始しており、平成 20 年度以降に水平坑道の一部において HFSC を用いたコンクリートの施工性確認試験（原位置試験）の実施を計画している。

地下施設における HFSC を用いた施工形態としては、場所打ち（覆工）コンクリート、吹付けコンクリートおよびグラウトを想定している。これらについて、平成 12 年度から研究を継続して行っており、これまでに以下に示す成果(○)および課題(△)が確認されている<sup>2),3),4),5),6)</sup>。

### (1) 場所打ちコンクリートの施工性と圧縮強度特性

- ：施工に必要な基本的要件（流動特性、初期強度など）を有することを確認した。
- ：セメントの混合割合（OPC:SF:FA）が、圧縮強度に及ぼす影響を確認した。
- ：FA の品質変動が、スランプおよび圧縮強度に及ぼす影響を把握した。
- △：製造実績がなく、現地材料を用いた HFSC コンクリートの製造可能性は未確認である。

### (2) 吹付けコンクリートの施工性と圧縮強度特性

- ：実規模の模擬坑道における吹付け試験により、吹付けの施工性について良好な結果が得られることを確認した。
- ：吹付けコンクリートについては、幌延の地下研究施設の設計基準強度を満たしうる高強度化が可能であることを確認した。

### (3) グラウト材料の施工性および pH 低下挙動

- ：グラウトとしての使用を目的とした微粒子材料（すりつぶした OPC, SF, 石灰石微粉末）を混合したセメントの pH 低下挙動を把握した。
- △：上記セメントを用いたグラウト材料の施工性については、未確認である。

### (4) 硬化コンクリートの pH 低下挙動

- ：セメントの混合比率および養生温度（室温から 65℃）が pH 低下挙動に与える影響を把握した。
- ：pH が 11 以下になるまでの期間を評価するために、室内浸漬試験およびポゾラン反応に関する反応定数を取得するための基礎試験を行った。
- △：平成 14 年度に HFSC424 等を用いたペーストの円盤試験体を作製し、以後浸漬水の pH を測定した。pH は材齢 2.5 年までは低下したが、材齢 3.5 年には低下が緩やかになっている。さらに長期の傾向を把握するため、浸漬を継続中である。
- △：平成 17 年度に HFSC424 を用いたペーストに急結剤を添加した吹付け材料等で円盤試験体を作製し、浸漬水の pH 低下速度を確認するために、浸漬を継続中である。

#### (5) HFSC コンクリート中の鉄筋腐食挙動

△：鉄筋を埋設した HFSC226 (OPC:SF:FA=20:20:60 wt.%) の供試体を海洋暴露し、暴露後 0.5 年の測定では普通コンクリートと比較して腐食が進行したため、HFSC226 を用いたコンクリート中の鉄筋は腐食し易い可能性を指摘したが、暴露後 3 年の測定では腐食進行の遅れが見られたため、海洋暴露を継続中である。

このように、HFSC の施工性や物性については知見が蓄積されてきており、その実用化の見通しが得られつつある一方で、長期的な変化には不明確な点も残されている。

平成 18 年度は、これまでに得られた知見に基づき、平成 20 年度以降に実施を予定している地下施設内での低アルカリ性コンクリート施工試験の詳細な計画を検討した。また、pH 低下挙動については、平成 17 年度までに浸漬した試料に対して分析を行い、残りの試料の浸漬を継続する。これらの検討結果に基づき、施工した構造物の品質が確保できることの見通しを得るとともに、最終的な原位置試験計画の策定に反映する。

### 3. HFSC を用いた低アルカリ性コンクリート施工計画の検討

#### 3.1 HFSC を用いた低アルカリ性コンクリート施工試験計画の検討

##### 3.1.1 目的

平成 17 年度の研究の成果<sup>2)</sup>を踏まえ、各種試験データが最も豊富なHFSC424 を吹付けコンクリートとして使用することを前提とした原位置試験計画を検討する。原位置試験の目的および検討に当たっての前提条件は、以下の通りとする。

- ① 本試験の目的は、以下の 2 点とする。
  - ・HFSC を用いたコンクリート材料が実際の地下空洞構築の際に、支保材料として適用可能であることの実証
  - ・実際の地質環境中に設置した HFSC の支保材料が、その周辺の地質環境に与える影響を把握する手法および影響を評価しうる手法の構築
- ② 原位置試験の実施場所は、幌延の地下施設の 140m 水平坑道の一角とする（地層は声問層）。
- ③ 試験開始～試験終了までの期間は、10 年程度を目安とする。
- ④ 普通セメントを使用したコンクリート支保工（以下、普通コンクリート支保工と呼ぶ）との比較が可能な計画とする。

HFSC を用いた吹付けコンクリートが実際の処分事業の坑道支保工として適用可能であるためには、施工性、支保工の力学的安定性の他、支保材料が周辺の地質環境に与える影響（pH など）について、明らかにする必要がある。

施工性は、実際の地下空洞の掘削面に支保工として構築することで確認する。支保工の力学的安定性は、求められる力学的性能について支保工内部の応力計測や材料物性試験および周辺岩盤の挙動も併せて計測することで確認する。支保材料が周辺の地質環境に与える影響については、周辺岩盤の pH やセメントからの溶出成分を確認する。

これらを踏まえ、吹付けコンクリートの原位置試験計画は、具体的には以下の①～④の項目を考慮して立案する。

- ① 施工性（吹付け性状）
- ② 支保工としての性能評価（pH、力学特性、耐久性（鉄筋腐食）、材料物性の変化）
- ③ 地下水の化学変化
- ④ 周辺岩盤との化学的相互作用（岩盤の変質、セメントの変質）

##### 3.1.2 試験項目と確認事項

原位置試験は、施工時のコンクリート吹付けや品質管理などの施工性確認と施工後の耐久性や支保材料が周辺の地質環境に与える影響に関する鉄筋腐食や pH、変形、ひび割れ、漏水等のモニタリングに大きく分けることができる。特にモニタリングに関しては長期評価が必要となるため、試験開始～試験終了までの期間は 10 年間とする。また、施工性確認にあたっては、原位置試験のための吹付けコンクリートの性状を事前に決定する必要があるため、予備試験を実施す

ることとする。各年度の試験項目と確認事項を表 3.1-1 に示す。

試験計画は、表 3.1-1 に示した試験項目を考慮しつつ、HFSC と OPC を用いた 2 つの吹付けコンクリートの施工を行い、両者のフレッシュコンクリートに関する試験結果や吹付け性状（施工性）に関する試験結果、硬化コンクリートに関する試験結果、長期的なコンクリートや岩盤の変質等を比較しながら総合評価できるように作成する。

表 3.1-1 各年度の試験項目と確認事項<sup>3),4),7)</sup>

試験項目		確認事項	試験期間（年）									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
施工時	ベースコンクリートの配合修正	・プラント練混ぜ性能 ・フレッシュコンクリート性状 ・硬化コンクリートの力学特性	○									
	施工設備を考慮した吹付けコンクリートの施工性確認	・施工設備 ・フレッシュコンクリート性状 ・硬化コンクリートの力学特性	○									
	水平坑道を用いた吹付けコンクリートの施工性確認	・施工システム ・フレッシュコンクリート性状 ・硬化コンクリートの力学特性	○									
施工後	支保工としての性能確認	・支保工コンクリートの物理特性	○		○		○		○			○
		・コア採取による目視観察 ・岩盤の物理特性	○		○		○		○			○
		・坑道壁面のひび割れおよび漏水の目視観察および測定 ・坑道の空洞変位 ・鋼製支保工応力 ・岩盤の地中変位	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	吹付けコンクリートおよび周辺岩盤の化学的影響確認	・支保工コンクリートの間隙、鉱物、元素などの組成	○		○		○		○			○
		・コア採取による目視観察 ・岩盤の間隙、鉱物、元素などの組成	○		○		○		○			○
		・ボーリング孔からの地下水採取による pH や水質の変化 ・漏水採取による pH や水質の変化	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注) 支保工コンクリートと岩盤のコア採取は、1 年目、3 年目、5 年目、7 年目、10 年目に実施する。

### 3.1.3 実施場所の選定

原位置試験の実施場所は、地下施設の 140m 水平坑道の一角とし、繊維補強吹付コンクリートを使用した交差部と立坑連接部を避けた図 3.1-1 に示す範囲とする。この図の 140m 水平坑道の水平断面図と坑道断面を図 3.1-2 に示す。なお、図 3.1-2 の水平断面図では、吹付けコンクリートの繊維補強範囲を示す。

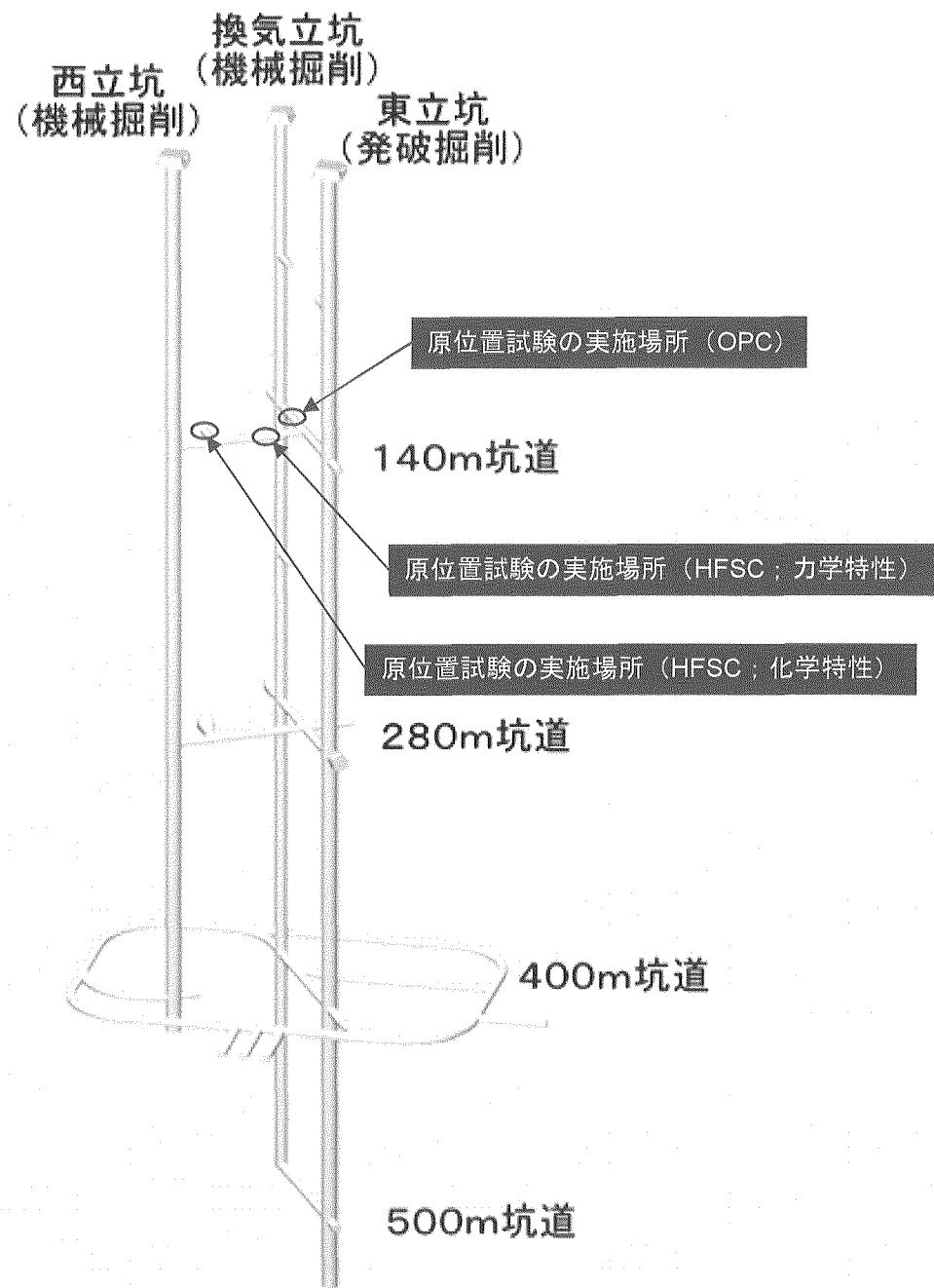


図 3.1-1 実施設計<sup>8)</sup>時の地下施設レイアウトに示す原位置試験の実施場所

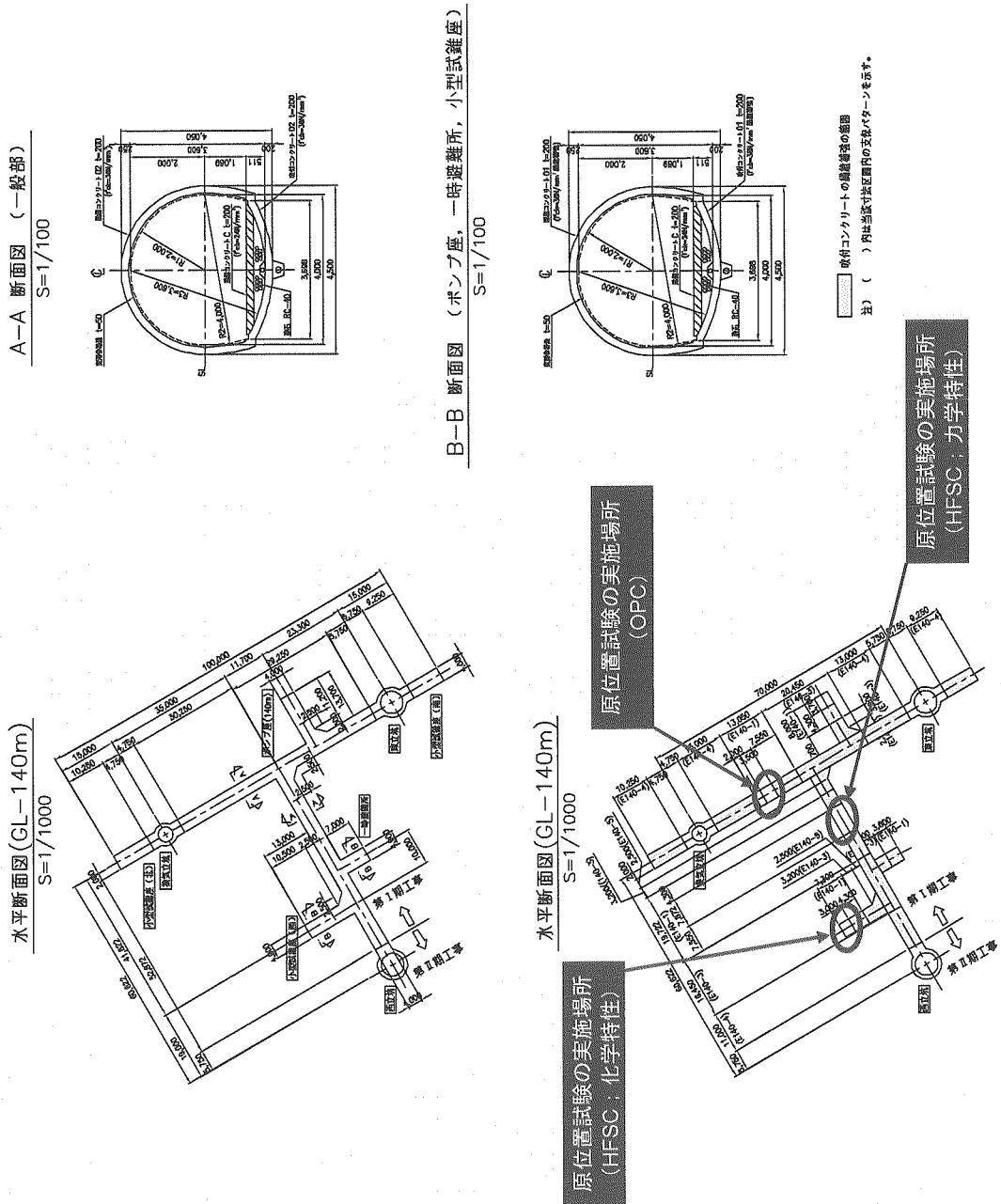


図 3.1-2 140m 水平坑道の水平断面図と坑道断面図（吹付けコンクリートの純粋補強範囲を含む）

### 3.1.4 予備試験

予備試験では、本試験に必要となる吹付けコンクリートを製作する上で必要な、現地の製造プラントの性能、運搬、吹付け量等を考慮したベースコンクリートの配合修正と吹付け機、急結剤供給装置等の施工設備の性能特性の把握およびフレッシュコンクリート・硬化コンクリートと吹付けコンクリートの性状を確認する。

#### (1) 使用材料

HFSCに使用する材料を表3.1-2に示す。また、ベースコンクリートに添加する高性能AE減水剤と急結剤を表3.1-3に示す。ベースコンクリートの材料は、平成17年度までに実施したHFSCの施工性に関する研究成果<sup>2)</sup>ならびに現地における吹き付けや覆工に用いる普通コンクリートに使用するものと同じ材料を選定した。表3.1-2に示す材料の物性は、以下の①～⑤のJIS規格等に基づき試験成績表や試験により確認する。

表 3.1-2 HFSC に使用する材料

材料	メーカー	仕様	備考
OPC	日鐵セメント社製	JISR5210	
SF	エルケム社製	JSCE D106 Grade940	
FA	北電興業社製 苦東厚真発電所産	JISA6201 II種相当	
細骨材	幌延砂利工業社製 幌延町浜里産	土木学会標準示方書の 標準粒度内	FM=2.78
粗骨材	幌延砂利工業社製 幌延町浜里産	5～15mm	

表 3.1-3 HFSC に使用する材料

材料	メーカー	仕様	備考
高性能 AE 減水剤	ポゾリス社製	SP8SV	
急結剤	電気化学工業社製	高強度吹付け用 TYPE10	添加量=C×10%

- ①セメント : JIS R 5210 のうち、密度、比表面積(Blain)、凝結、圧縮強さ、化学成分、全アルカリ量
- ②シリカフューム : JIS A 6207 のうち、二酸化けい素、酸化マグネシウム、三酸化イオウ、遊離酸化カルシウム、遊離けい素、塩化物イオン、強熱減量、湿分、密度、比表面積(BET)、活性度指数(材齢7日、28日)
- ③フライアッシュ : JIS A 6201 のうち、二酸化けい素、湿分、強熱減量、粉末度(Blain)、密度、45μm ふるい残分、フロー値比、活性度指数(材齢7日、28日)、メチレンブルー吸着量

- ④細骨材 : JIS A 1102 (ふるい分け), JIS A 1103 (微粒分量), JIS A 1104 (単位容積質量および実積率), JIS A 1109 (密度および吸水率), JIS A 1111 (表面水率)
- ⑤粗骨材 : JIS A 1102 (ふるい分け), JIS A 1103 (微粒分量), JIS A 1104 (単位容積質量および実積率), JIS A 1110 (密度および吸水率)

## (2) コンクリートの製造

ベースコンクリートの製造は、現場で供用中のコンクリート製造設備で行うことを前提とする。この設備はミキサー、セメントサイロ、骨材ビンで構成され、最大供給能力は約 40m<sup>3</sup>/hを見込んでいる。セメントサイロは、高炉B種セメントと早強セメント、FAが貯蔵されている。骨材ビンは、細骨材と粗骨材(20mm, 40mm, 5~15mm)の4種類の骨材が分離貯蔵できる設備である。HFSCの製造では、OPCを使用するため、3基のうち1基にOPCを貯蔵するか、OPC用のサイロを増設する必要があり、今後の調整が必要である。また、SFの投入が必要であるが、少量であるため、機械による投入はできない。そのため、SFは、ミキサーへ人力で投入することとする。これらは、原位置において本試験を実施する場合に使用する機材および手順とほぼ同じである。

## (3) ベースコンクリートの配合修正

幌延深地層研究計画における地下施設の実施設計において、水平坑道の吹付けコンクリートは、厚さ 20cm で設計基準強度 36N/mm<sup>2</sup>が必要とされている。このため、平成 17 年度までに、高強度化を図るために模擬坑道へのコンクリートの吹付け試験と現地で使用しているセメントや骨材等を用いた配合選定試験を実施して、上記設計基準を満たし得る HFSC424 を用いた W/B=40% のコンクリート配合を選定した。

しかし、製造設備の違いがコンクリート性状に影響を与える可能性もあるため、表 3.1-2 に示す材料を用いた急結剤の添加前のベースコンクリートについて、水結合材比および細骨材率を変化させた試験練りを行い、所定の設計基準強度を満足するコンクリート配合を選定する。

### (i) ベースコンクリートの配合

現地で使用しているセメントや骨材等を用いた硬化前のフレッシュコンクリートの状態におけるベースコンクリートの最適配合を表 3.1-4 に示す。

表 3.1-4 ベースコンクリートの配合

セメント 種類	スランプ (cm)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
				W	OPC	SF	FA	S	G	減水剤
HFSC 424N	18±2	40	60	175	175	88	175	975	655	HFSC ×0.9%

### (ii) 検討配合

検討配合を表 3.1-5 に示す。HFSC の吹付けコンクリートの目標強度と施工性（特に、ポンプ圧送性に関する粘性）から水結合材比 40%，細骨材率 60%を基準に確認する。なお、スランプは  $18\text{cm}\pm2\text{cm}$  となるように高性能 AE 減水剤を添加する。

表 3.1-5 検討配合

セメント種類	ベースセメント	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)
HFSC424N	OPC	40	60

## (iii) 試験項目と試験方法

表 3.1-5 に示す検討配合の試験練りを行い、フレッシュコンクリートと硬化コンクリートについて施工性および硬化後のコンクリートに関する性能の確認試験を行う。フレッシュコンクリートに関する試験項目と試験方法を表 3.1-6 に、硬化コンクリートに関する試験項目と試験方法を表 3.1-7 に示す。これらの試験結果を踏まえ、原位置試験に適用する最終的なコンクリートの配合などを決定する。

表 3.1-6 フレッシュコンクリートに関する試験項目と試験方法

試験項目	試験方法	管理値
スランプ試験	JIS A 1101 に準拠（経時変化の確認を含む）	$18\text{cm}\pm2\text{cm}$
空気量試験	JIS A 1128 に準拠	—
コンクリート温度の測定	温度計にて測定	—
スランプフローの測定	JSCE F 503 に準拠	—
目視観察	フレッシュ状態のコンクリートについて、ばさばさである、粘りがある等の定性的な評価	—

表 3.1-7 硬化コンクリートに関する試験項目と試験方法

試験項目	試験方法	管理値
圧縮強度試験	吹付けコンクリートのコア採取方法は、JSCE-F 552, JSCE-F 561 に準じ、圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準拠する。 ①材令：7 日，28 日 ②養生方法：標準水中養生 ③供試体数：各材齡とともに 3 供試体 ④試験体寸法： $\phi 100 \times 200\text{mm}$	$36\text{N/mm}^2$ 以上 (材齡 28 日)

## (4) 吹付けコンクリートの性状確認

(3)で決定した配合の HFSC を用いたコンクリートを実際に岩盤壁面に吹付け施工する場合、その施工性は、コンクリートポンプや急結剤供給装置等の施工設備により異なる可能性がある。このため、実際に現地で使用されている吹付け施工設備を使用し、圧送性、はね返り率などの施工性や実際に吹付けた状態でのコンクリートの力学的特性を地上における模擬試験によって確認する。

## (i) ベースコンクリートの配合

ベースコンクリートは、(3)で修正した配合とする。

#### (ii) 試験機械

主要な試験の使用機械を表 3.1-8 に示す。基本的には、「幌延深地層研究計画 地下施設工事（第 I 期工事）」で使用する機械を用いる。急結剤添加装置の例を図 3.1-3 に、コンクリートポンプの例を図 3.1-4 に示す。

表 3.1-8 主要な試験の仕様機械

機械名	形式・能力等	備考
バックホウ	0.09m <sup>3</sup> 級油圧式	
急結剤添加装置	デンカ NATM クリート 150V (150L タンク) 動力電源 3 相 AC200V	
コンクリートポンプ	定置式電動タイプ MKW-10SVH・SM 吐出量 1~10m <sup>3</sup> /h	
コンプレッサ	エンジン式 BA6 190 18.5m <sup>3</sup> /min 0.69MPa	

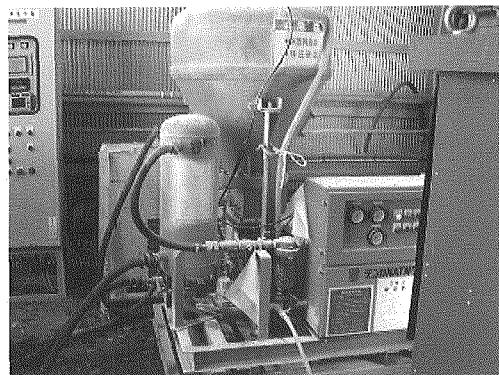


図 3.1-3 急結剤添加装置の例

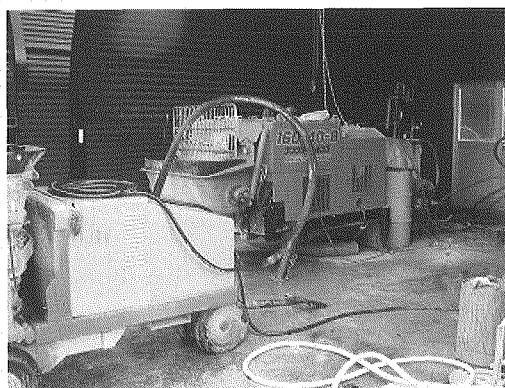


図 3.1-4 コンクリートポンプの例

## (iii) コンクリートの製造および運搬

コンクリートは、「幌延深地層研究計画 地下施設工事（第Ⅰ期工事）」のコンクリート製造設備で製造し、これを4.5m<sup>3</sup>積みのアジテータ車で試験場所へ運搬する。

## (iv) パネル型枠を用いた吹付けコンクリートの施工

試験場所付近に設置したコンクリートポンプより、マテリアルホース（Φ65mm）にて、パネル型枠をセットしたところまで圧送し、0.09m<sup>3</sup>級のバックホウのバケットに吹付けノズルを固定して、後方より操作する。

コンクリートポンプは、水平坑道の吹付けに使用するスカフォード上に搭載可能な寸法で、かつ水平坑道の延長を考慮して圧送可能な7m<sup>3</sup>/hを使用する。パネル型枠を用いた試験施工図を図3.1-5に示す。

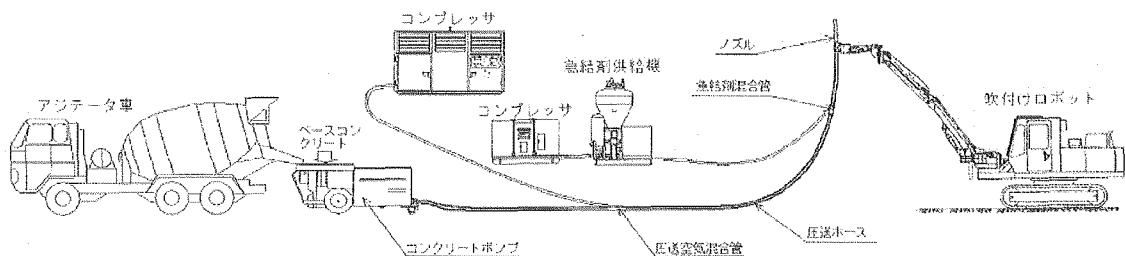


図 3.1-5 パネル型枠を用いた試験施工図

## (v) 試験項目と試験方法

パネル型枠に吹付け施工したコンクリートのフレッシュ性状における試験項目と試験方法を表3.1-9に示す。これはベースコンクリートに対する項目と同様である（表3.1-6）。吹付け時の性状（施工性）に関する試験項目と試験方法を表3.1-10に、パネル型枠に吹付けた硬化コンクリートに関する試験項目と試験方法を表3.1-12に示す。また、はね返り率、圧縮試験、割裂引張強度試験の供試体切り用のパネル型枠を図3.1-6に示す。この型枠の最小寸法は、表3.1-11とする。表3.1-10に示す目視による吹付け状況の評価の指標となる施工性評価基準を表3.1-13に示す。

これらの試験結果に基づき、施工性および硬化コンクリートが有する力学特性が設計基準を満足することを低アルカリ性コンクリートの配合を最終的に確認し、原位置での本試験に供することとする。

表 3.1-9 フレッシュコンクリートに関する試験項目と試験方法（再掲）

試験項目	試験方法	管理値
スランプ試験	JIS A 1101に準拠（経時変化の確認を含む）	18cm±2cm
空気量試験	JIS A 1128に準拠	—
コンクリート温度の測定	温度計にて測定	—
スランプフローの測定	JSCE F 503に準拠	—
目視観察	フレッシュ状態のコンクリートについて、ばさばさである、粘りがある等の定性的な評価	—

表 3.1-10 吹付け性状（施工性）に関する試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
目視観察による吹付け状況の評価	吹付け状況を点数法（5段階）により評価する。試験項目は、①混合状態、②脈動状態、③ノズルだれ、④急結状態、⑤粉塵、⑥付着状態等とし、複数（3人以上）の観察者による評価とする。
はね返り率の測定	回収したはね返り材の重量を吹付けに要したコンクリート重量で除して算出する。
急結剤添加率の測定	急結剤添加装置の吹付け前後での重量差から測定する。
コンクリート吐出量の測定	実吐出量と吹付け時間を測定し、実吐出能力を測定する。

表 3.1-11 パネル型枠の最小寸法

用途	a	b	c
トンネル	500	500	150
のり面	300	300	200 (4)
補修・補強	300	300	150

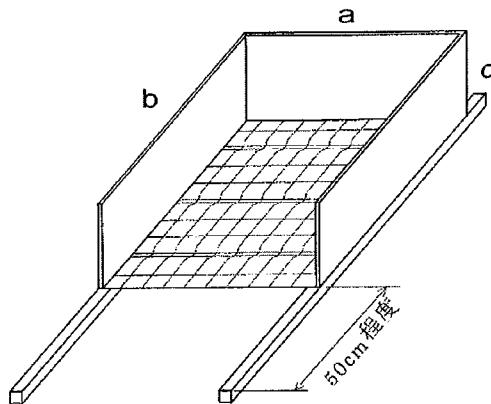


図 3.1-6 パネル型枠

表 3.1-12 硬化コンクリートに関する試験項目と試験方法

試験項目	試験方法	管理値
初期強度試験 (プルアウト法)	土木学会規準 JSCE-G561-1999「引抜きによるコンクリートの初期強度試験方法」に準拠 ①試験材齢：3時間、6時間、24時間 ②養生方法：現場湿潤養生 (材令24時間のみ20°C湿潤養生) ③供試体数：各材齢とも3供試体	—
圧縮強度試験	吹付けコンクリートのコア採取方法は、JSCE-F 552, JSCE-F 561に準じ、圧縮強度試験は、JIS A 1108に準拠する。 ①材齢：7日、28日、42日、56日 ②養生方法：標準水中養生 ③供試体数： ベースコンクリート 3供試体 吹付けコンクリート 4供試体 ④試験体寸法： ベースコンクリート $\phi 100 \times 200\text{mm}$ (現着時採取) 吹付けコンクリート $\phi 50 \times 100\text{mm}$ (コア採取)	36N/mm <sup>2</sup> 以上 (材齢28日)
吹付け方向の 気泡観察	吹付け方向にコア採取し、断面を切断した後、切断面を観察し、気泡の混入状況を観察する。	—

表 3.1-13 施工性評価基準

項目	良	← 目視評価 →			否	判断基準
	5	4	3	2	1	
混合状態	良		普通		否	ノズルから吐出後のコンクリートと急結剤の混合状態。たとえば、白いスジが見られる場合は、良い状態とは言えない。
脈動状態	なし		普通		激しい	マテリアルホースの脈動、あばれ。管内の付着物が多くなったり、コンクリートの流動性低下などに起因する。脈動の増加は閉塞の前兆ととらえられる。
ノズルだれ	なし		普通		多い	ノズルの先端から配管内のノロが落ち散る状態。コンクリートの性状や急結剤の混合状態、圧送空気圧力の不足、ノズルチップの絞りなどに起因する。
急結状態	急結		普通		遅い	壁面付着後の急結状態。基本的に吹付け後の触指で判断。天端部では、吹付けエアによる下地コンクリートの「捲られ」などの動きで判断する。
粉じん	少		普通		多	粉じんの多少を判断。地表で行うため風の影響や光線の加減で判断しにくいかも知れないが、基準ケースとの相対比較で判断する。
付着状態	良		普通		否	リバウンド・たれ・圧送エアによる「捲られ」や、吹付け表面の平滑さを含む総合的な付着状態を判断。ただし、付着状態の良否には急結性の判断は含まれない。

### 3.1.5 施工性確認試験

140mの水平坑道において 3.1.4 で決定した低アルカリ性コンクリートを実際の岩盤掘削面に吹付け、支保工を構築する。また、吹付け施工後の硬化コンクリートよりサンプリングを行い、その力学特性などを室内試験により確認する。この際、実施工の吹付け作業を行う環境下で、実際の施工条件を考慮した圧送性、はね返り率、粉じん濃度<sup>2)</sup>を確認する。

#### (1) ベースコンクリートの配合

ベースコンクリートの配合は、3.1.4 の結果に基づき設定する。

#### (2) 使用機械

3.1.4 の予備試験時に使用した装置と同一の性能を有する装置とする。

#### (3) コンクリートの製造および運搬

コンクリートは、「幌延深地層研究計画 地下施設工事（第Ⅰ期工事）」のコンクリート製造設備で製造する。これを 4.5m<sup>3</sup>積みのアジテータ車で東立坑まで運搬し、さらに立坑のキブルで 140m の水平坑道近くに設置されるスカフォード足場上に搭載したコンクリートポンプまで運搬する。

#### (4) 吹付けコンクリートの施工

立坑下端に位置するスカフォード足場上に搭載したコンクリートポンプより、マテリアルホース（ $\phi 65\text{mm}$ ）にて、切羽まで圧送する。

コンクリートポンプは、スカフォード上に搭載可能な寸法で、かつ水平坑道の延長を考慮して圧送可能な  $7\text{ m}^3/\text{h}$  を使用する。

断面が小さいため、専用の吹付けロボットを投入することは困難である。したがって、従来では人力による手吹き作業となるが、作業環境が悪いこと、ノズルマンが切羽直下に立ち入らなければならぬことから、安全上好ましくない。そこで、 $0.09\text{m}^3$ 級のバックホウのバケットに吹付けノズルを固定して、後方より操作する。水平坑道の試験施工図を図 3.1-7 に示す。なお、パネル型枠を坑道内へ設置し合わせて吹付け、供試体を製作する。

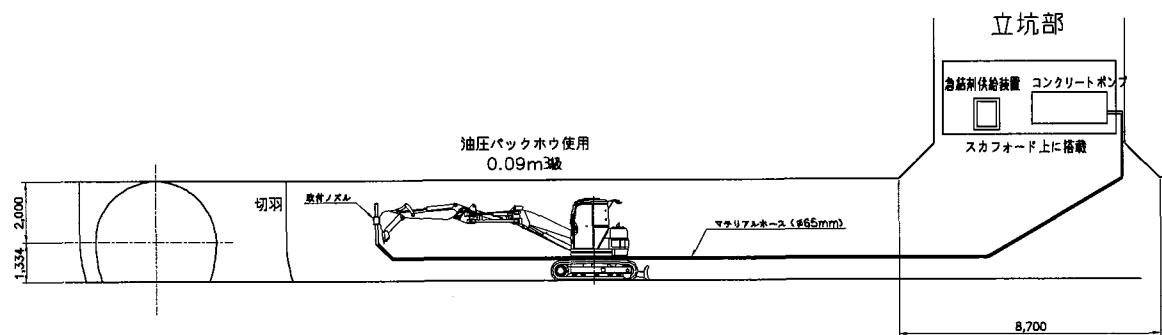


図 3.1-7 水平坑道の試験施工図

### (5) 試験項目と試験方法

フレッシュコンクリートと吹付け性状（施工性）に関する試験項目と試験方法は、3.1.4(4)の性状確認と同様である。ベースコンクリートと吹付けコンクリートの硬化コンクリートに関する試験項目と試験方法を表 3.1-14 に示す。

これらの試験により、実岩盤への施工に関する低アルカリ性コンクリートの適用性が確認される。

表 3.1-14 硬化コンクリートに関する試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
初期強度試験（プルアウト法）	<p>土木学会規準 JSCE-G561-1999 「引抜きによるコンクリートの初期強度試験方法」に準拠</p> <p>①試験材齢：3 時間, 6 時間, 24 時間      ②養生方法：現場湿潤養生（材令 24 時間のみ 20°C 湿潤養生）      ③供試体数：各材齢とも 3 供試体</p>
圧縮強度試験	<p>吹付けコンクリートのコア採取方法は、JSCE-F 552, JSCE-F 561 に準じ、圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準拠する。</p> <p>①材令：7 日, 28 日, 42 日, 56 日      ②養生方法：標準水中養生      ③供試体数：      ベースコンクリート 3 供試体      吹付けコンクリート 4 供試体      ④試験体寸法：      ベースコンクリート <math>\phi 100 \times 200\text{mm}</math> (現着時採取)      吹付けコンクリート <math>\phi 50 \times 100\text{mm}</math> (コア採取)</p>
静弾性係数の測定	JSCE-G 502 に準拠する。試験は圧縮強度試験と同時に実施する。
吹付けコンクリートの圧縮強度試験	実際に吹付けた壁面のコンクリートをコアリング後、端面整形し $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の供試体で圧縮強度試験を実施する。
割裂引張強度試験	<p>土木学会規準 JIS A1113-1999 に準拠して実施する。</p> <p>①材令：28 日      ②養生方法：標準水中養生      ③供試体数：      ベースコンクリート 3 供試体      吹付けコンクリート 4 供試体      ④供試体寸法：      ベースコンクリート <math>\phi 100 \times 200\text{mm}</math> (現着時採取)      吹付けコンクリート <math>\phi 50 \times 100\text{mm}</math> (コア採取)</p>
クリープ試験	JIS 原案に準拠して実施する。
透水試験	<p>試験方法は、コンクリートから透水した量を測定するアウトプット法とする。</p> <p>①材齢：28 日      ②供試体寸法：<math>\phi 150 \times 150\text{mm}</math>      ③算定式：  <math display="block">\text{透水係数} = \text{水の単位容積重量} \times (\text{供試体高さ} / \text{水圧}) \times (\text{流出量} / \text{供試体断面積})</math></p>

### 3.1.6 支保工としての性能確認試験<sup>5)</sup>

ここでは、3.1.5に述べた施工性の確認に続き、空洞の力学的安定性保持という支保工に求められる性能について、10年間という時間経過を考慮した試験を実施する。

#### (1) コア採取

コア採取は、140mの水平坑道のHFSCの力学特性と化学特性、OPCの各試験場所で実施する。具体的には、図3.1-8に示すコア採取位置より3本のコアを採取する。

資機材は、東立坑坑口の近くに仮置場を定めた上で、4トントラックで搬入し、所定の場所に仮置する。搬入時期については他の工事と重なり合わぬよう十分調整した上で定める。また、資機材の坑内搬入時には採水装置等の資機材も併せて搬入する。コアドリルによりコア採取を実施する（図3.1-9）。

立坑への資機材の搬入は、東立坑を使用し、大きな資機材についてはキブルを使用し、小資材は人用エレベータも使用する。キブルの収納範囲には限度があるため、事前にボーリング機械等、立坑運搬に支障をきたす機材については分解した上で搬入し、坑内で組み立てるものとする。

坑内における資機材配置および給排水ライン系統については、地下施設工事（第I期工事）と協議しながら進める。

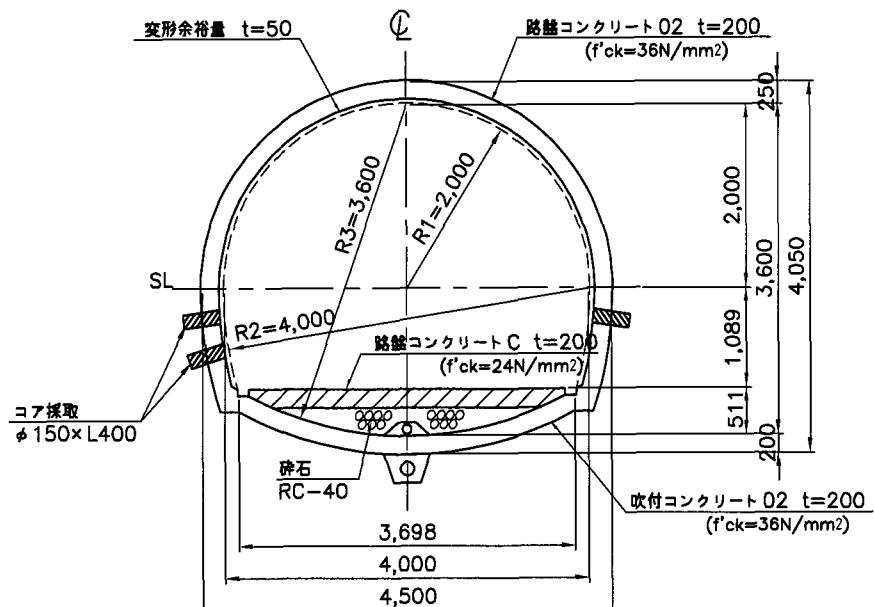


図 3.1-8 コア採取位置

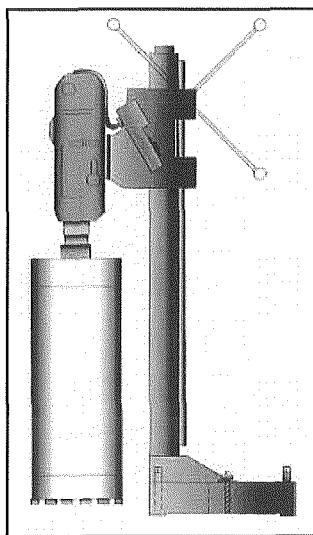


図 3.1-9 コアドリル

## (2) 支保エコンクリートの材料特性に関する試験および支保工の応力・変形計測

材料特性に関する試験は、弾性係数と圧縮強度に関する測定を行う。具体的には、打設後 1 日、3 日、28 日、91 日後まではパネル型枠に吹付けたコンクリートより供試体を採取し試験を実施する。その後 1 年～10 年後までは支保工コンクリートからコア採取した供試体を用い試験を実施する。試験方法は JIS A 1108 に準じる。

支保工の応力・変形計測に関しては、支保工内部に設置したコンクリート応力計とコンクリートひずみ計で実施する。計測は、打設直後から材料試験と同様 10 年間継続して行う。計測点は、2 箇所 × 断面円周 4 箇所とする。計測手順を以下に示す。

打設するコンクリートを事前にコンクリート応力計とコンクリートひずみ計に充填する。

岩盤掘削の壁面の所定の位置に固定し、吹付けコンクリートを構築する。

自動計測システムを設置して連続的に計測する。

コンクリート応力計の仕様の例を表 3.1-15 に、コンクリート応力計を図 3.1-10 に、コンクリート応力計の設置状況の例を図 3.1-11 に示す。コンクリートひずみ計の仕様と概観図の例を図 3.1-12 に、コンクリートひずみ計の設置状況の例を図 3.1-13 に示す。また、コンクリート応力計とコンクリートひずみ計の設置位置を図 3.1-14 に示す。

表 3.1-15 コンクリート応力計の仕様の例<sup>9)</sup>

項目	種別	メーカー	型式	仕様
支保工コンクリート応力	コンクリート有効応力計	東横エルメス	GK-20N-202	20N/mm <sup>2</sup>

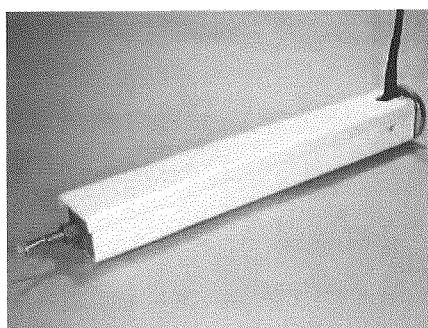


図 3.1-10 コンクリート応力計

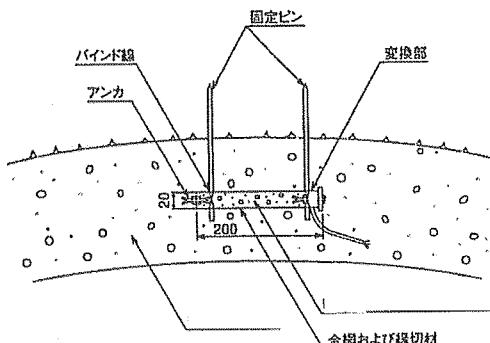
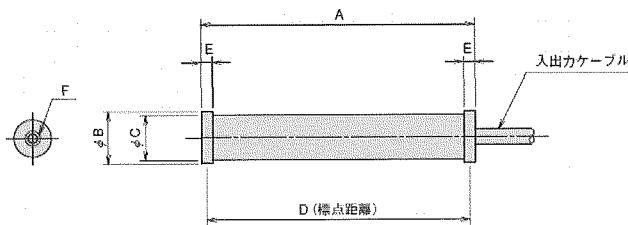


図 3.1-11 コンクリート応力計の設置状況の例

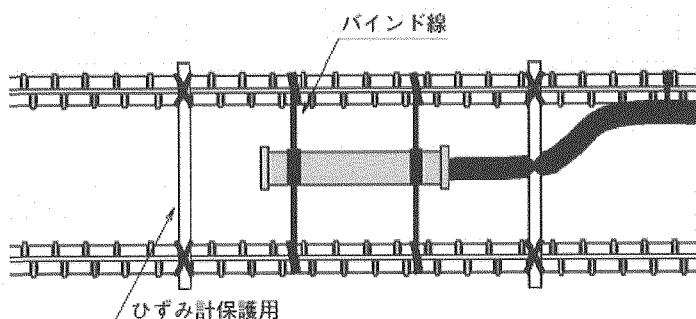


型名	A	B	C	D	E	F	質量(g)
KM-30	34	12	10	31	3	M3 深4	12
KM-50F	54	20	17	50	4	M3 深6	45
KM-100A	104	20	17	100	4	M3 深6	75
KM-100B	104	20	17	100	4	M3 深6	80
KM-100HB	104	20	17	100	4	M3 深6	80
KM-200A	205	28	23	200	5	M5 深8	220
KM-100AT	104	20	17	100	4	M3 深6	75
KM-100BT	205	28	23	200	5	M5 深8	220
KM-200AT	205	28	23	200	5	M5 深8	220

## ■仕様

型名	KM-30	KM-50F	KM-100A	KM-100B	KM-100HB	KM-200A	KM-100AT	KM-100BT	KM-200AT
±5000×10 <sup>-6</sup> ひずみ									
容量	31mm	50mm	100mm	200mm	100mm	200mm	100mm	200mm	200mm
標点距離									
定格出力	約2.5mV/V (5000×10 <sup>-6</sup> ひずみ)	約4mV/V (8000×10 <sup>-6</sup> ひずみ)	約2.5mV/V (5000×10 <sup>-6</sup> ひずみ)	約5.0mV/V (10000×10 <sup>-6</sup> ひずみ)	約2.5mV/V (6000×10 <sup>-6</sup> ひずみ)	約5.0mV/V (10000×10 <sup>-6</sup> ひずみ)	約2.5mV/V (6000×10 <sup>-6</sup> ひずみ)	約5.0mV/V (10000×10 <sup>-6</sup> ひずみ)	約5.0mV/V (10000×10 <sup>-6</sup> ひずみ)
非直線性					1%RO				
見かけの弾性係数	約40N/mm <sup>2</sup>	約1000N/mm <sup>2</sup>	約40N/mm <sup>2</sup>	約1000N/mm <sup>2</sup>	約40N/mm <sup>2</sup>	約1000N/mm <sup>2</sup>	約40N/mm <sup>2</sup>	約1000N/mm <sup>2</sup>	約1000N/mm <sup>2</sup>
測温機能	—	—	*1ひずみゲージ(360Ω 1ゲージ3線法: 約60×10 <sup>-6</sup> ひずみ/C)	—	—	—	*2熱電対 T	—	—
許容温度範囲	-20～+60°C	-20～+80°C	-20～+180°C	—	—	-20～+80°C	—	—	—
入出力抵抗	120Ω 2ゲージ法	—	—	350Ω 4ゲージ法	—	—	—	—	—

※1 相対湿度が計測できます。  
※2 実温度が測定できます。

図 3.1-12 コンクリートひずみ計の仕様と概観図の例<sup>10)</sup>図 3.1-13 コンクリートひずみ計の設置状況の例<sup>10)</sup>

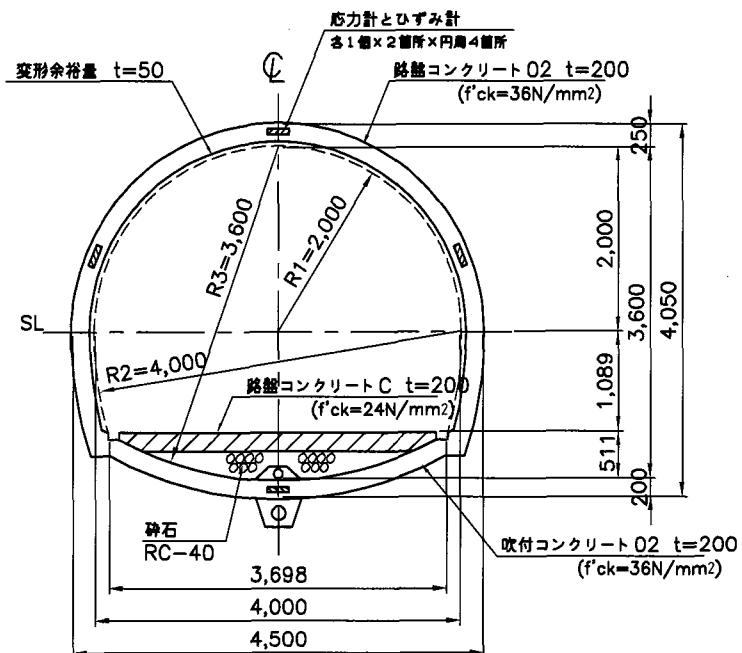


図 3.1-14 コンクリート応力計とコンクリートひずみ計の設置位置

(3) 支保工周辺岩盤の物性の変化と変形挙動に関する計測<sup>5)</sup>

ここでは、(2)に述べた支保工自体の力学特性に関する計測の妥当性の評価などを行うためのデータ取得を目的として、支保工周辺岩盤の物性変化や変形挙動に関する計測を実施する。

## (i) 内空変位・天端沈下測定

内空変位と天端沈下測定データは、周辺岩盤の変形モードを定性的に把握するためのデータの一つとなる。変位の計測は、光波測距儀により行う。機器の仕様を表 3.1-16 に、測定機器の概要を図 3.1-15 に、内空変位側線を図 3.1-16 に示す。

表 3.1-16 変位測定器の仕様の例

項目	種別	メーカー	型式	仕様
内空変位	トータル ステーション	ソキア	MONMOS 3-D STATION NET2000	測距制度 $\pm (0.8+1\text{ppm} \times D)\text{mm}$

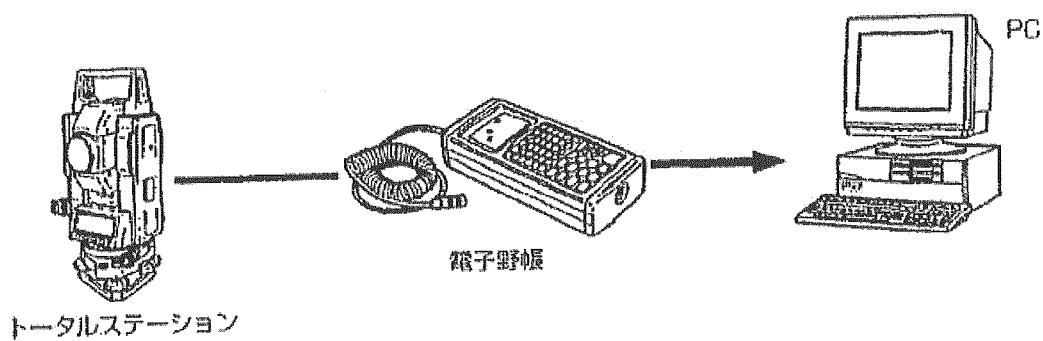


図 3.1-15 変位測定器

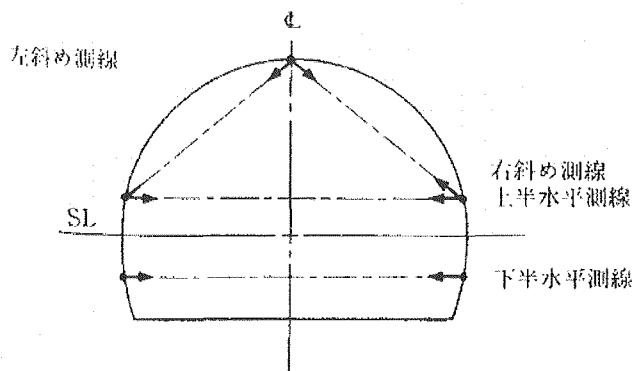


図 3.1-16 内空変位側線

#### (4) 鋼製支保工応力

鋼製支保工は吹付けコンクリートより先に施工されかつ材料自体の不均質性がないため、岩盤から作用する応力や変形の定量的な評価の一つの指標となる。鋼製支保工の応力測定は、抵抗線ひずみゲージを鋼製支保工に貼り付け、軸力・せん断力 曲げモーメントを計測する。溶接ゲージの仕様の例を表 3.1-17 に、設置方法を図 3.1-17 に示す。

表 3.1-17 溶接ゲージの仕様の例

項目	種別	メーカー	型式	仕様・配置
支保工応力	溶接ゲージ	東京測器	AWC-8B-11-3LT	3 成分

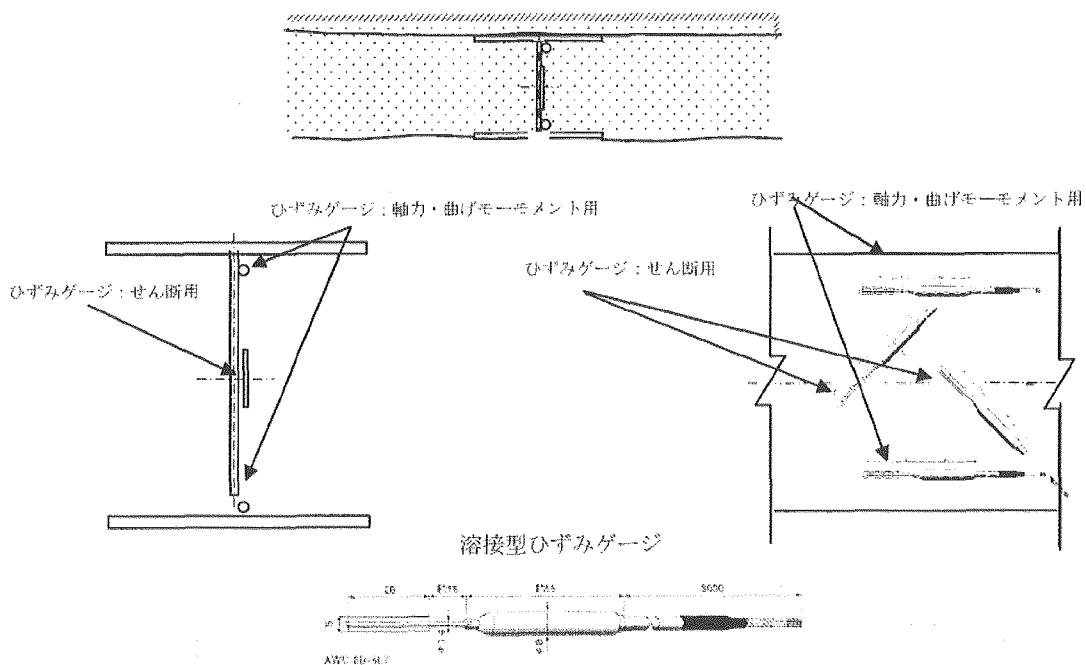


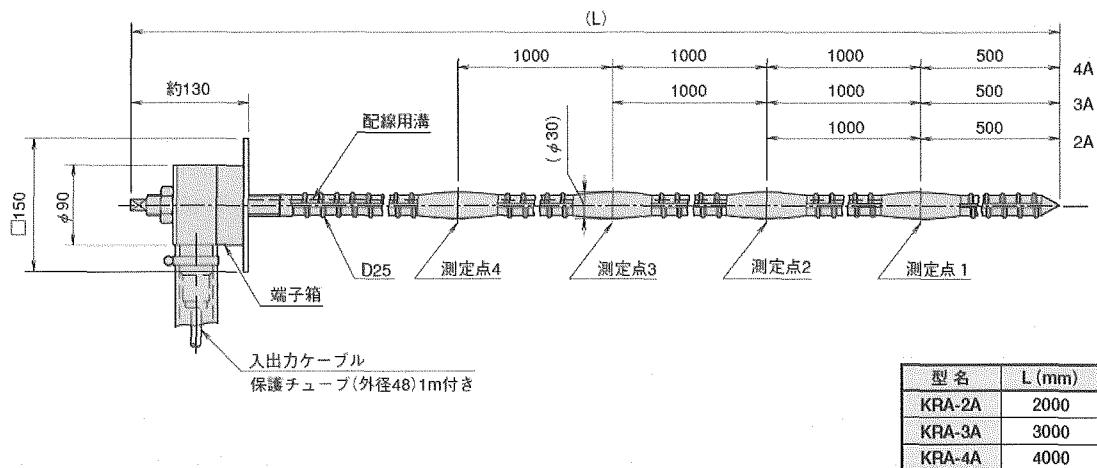
図 3.1-17 溶接ゲージの設置方法

### (5) ロックボルト軸力

ロックボルトは本来ゆるみ領域外の健全な岩盤と吹付けコンクリート支保工をつなぐ役割を果たすため、その軸力を測定することで掘削により岩盤がゆるんだ領域の範囲などを把握できる可能性がある。ここでは、抵抗線ひずみゲージを利用したロックボルト軸力計を使用することで、ロックボルト軸力を測定する。ロックボルトの固定には、HFSCを用いたモルタルを使用するが、腐食速度についての課題が残されている。ロックボルト軸力計の仕様の例を表 3.1-18 に、設置状況と仕様の例を図 3.1-18 に示す。

表 3.1-18 ロックボルト軸力計の仕様の例<sup>10)</sup>

型名	KRA-2A	KRA-3A	KRA-4A
測定点数	2点	3点	4点
容量		80kN	
重力系参考値		8.2tf	
定格出力		約1.7mV/V (約3400×10 <sup>-6</sup> ひずみ)	
非直線性		1%RO	
許容温度範囲		0~+60°C	
入出力抵抗		350Ω	
推奨印加電圧		6V以下	
許容印加電圧		10V	
初期不平衡		±5000×10 <sup>-6</sup> ひずみ	
入出力ケーブル	Φ11.5mm 0.3mm <sup>2</sup> 12心シールドビニールケーブル 2m 先端ばら線		Φ16.5mm 0.3mm <sup>2</sup> 24心シールドビニールケーブル 2m 先端ばら線
質量	約9.5kg	約13kg	約16.5kg

図 3.1-18 ロックボルト軸力計の設置状況<sup>10)</sup>

#### (6) 岩盤の圧縮試験、弾性係数、応力

コンクリートのコア採取と併せて岩盤中の掘削影響領域程度までのコアを採取する。このコアを用いて、一軸圧縮試験と三軸圧縮試験を実施し、圧縮強度、弾性係数、ポアソン比、応力-ひずみ曲線を測定する。なお、超音波法を用いた非破壊試験も併せて実施する。

#### (7) 岩盤の地中変位

岩盤の地中変位は、支保工周辺岩盤の変形挙動を定量的に示すデータであるため、支保工の安定性評価などに非常に有益なデータとなる。本計測では、水平坑道の半径方向に多点式地中変位計を5箇所に設置して計測する。施工手順は以下の通りである。地中変位計の仕様の例を表3.1-19に、地中変位計を図3.1-19に、地中変位計の設置状況を図3.1-20に示す。

- ① 坑道の吹付けコンクリート壁面の所定の位置に削岩機で穿孔する。
- ② 孔内に多点式地中変位計を設置し、アンカーを水圧ポンプで固定する。
- ③ 自動計測システムに接続し計測を開始する。

表 3.1-19 地中変位計の仕様の例<sup>9)</sup>

項目	種別	メーカー	型式	仕様・配置
地中変位	地中変位計	東横エルメス	PV-100-5SG	6m 5点
			PV-100-4SG	4m 4点
			PV-100-4SG	3m 4点

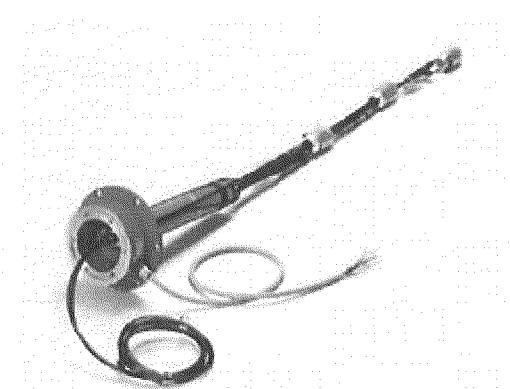


図 3.1-19 地中変位計

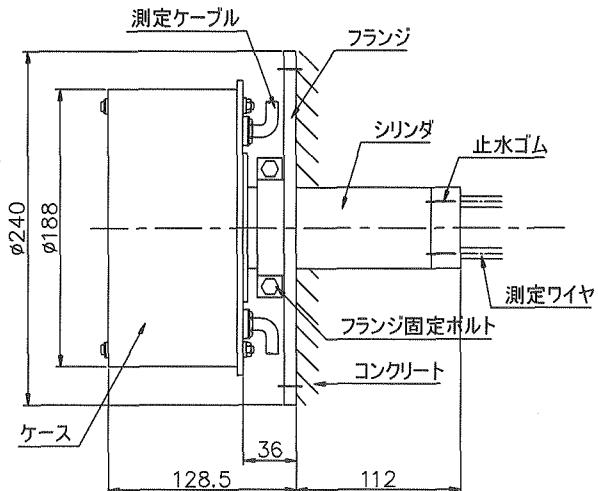


図 3.1-20 地中変位計の設置状況

### (8) 支保工のひび割れや漏水

ひび割れは、初期欠陥のひとつであり、将来、支保工の劣化を促進させる要因となる可能性があるため、重要な調査項目の一つとなる。発生原因としては材料、水和熱、収縮、施工、構造によるものが考えられる。

ひび割れの調査項目としては、

ひび割れの位置、長さ、ひび割れ幅

ひび割れ深さ

発生時期

などが上げられる。ひび割れの調査方法は機械式、電気式、可視、超音波によるものがある。

漏水はひび割れ箇所や打継目等から生じる場合が多く、漏水位置調査により漏水の要因を調査することができる。漏水位置調査方法には赤外線法がある。

壁面からの漏水位置調査に赤外線を用いる方法には、直接温度を測定する場合と、加熱後の温度低下により測定する場合がある。前者は湧水温度が壁面と異なり湧水量が多い場合に向いており、後者は湧水温度が壁面と同様であり湧水量が少ない場合に向いている。原位置試験では坑内環境に応じて選択することとする。

### 3.1.7 吹付けコンクリートおよび周辺岩盤の化学的影響確認試験

周辺環境（周辺地盤、地下水）と吹付けコンクリートの相互作用において問題となる事象としては、以下のものが挙げられる。これらの化学的影响に関する概念図を図 3.1-21 に示す。図には、丸印で各事象が発生する場所を示し、引き出し線で結ばれた拡大図とボックスで事象の概要を説明している。また各事象の特性を、「化学特性」、「透水特性」等のキーワードにより表現した。

- ・ 吹付けコンクリートと地下水を含む岩盤が接触することによるセメント成分の溶脱現象
- ・ 吹付けコンクリート内を地下水が浸透することによるセメント成分の溶脱現象
- ・ 吹付けコンクリート内の亀裂や打継目を地下水が移流することによるセメント成分の溶脱現象

- 地下水に含まれる酸（硫酸や塩等）が覆工コンクリートと接触することによるコンクリート表面の侵食
- 吹付けコンクリートの力学的強度の低下
- 吹付けコンクリートの透水係数・拡散係数の増加
- 周辺岩盤のゆるみ域の増加による新たな移行経路の形成

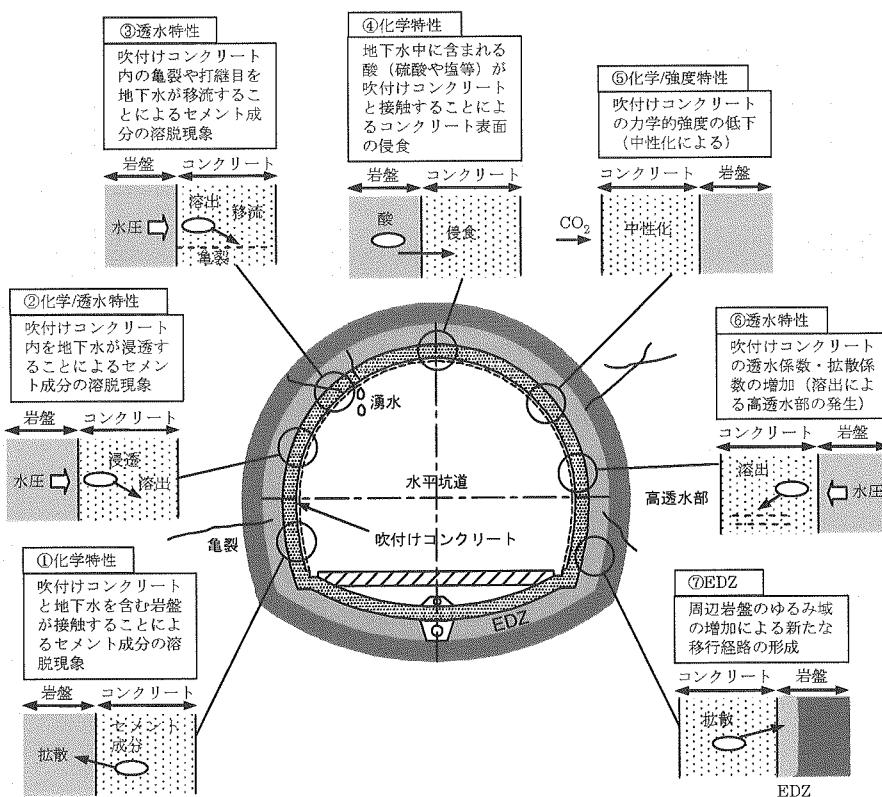


図 3.1-21 化学的影响に関する概念図

### (1) 計測項目

これら周辺環境（周辺地盤、地下水）と吹付けコンクリートの相互作用において問題となる事象は、長期（処分場閉鎖後レベル）に及ぶ影響も考慮した場合で、10年間程度で起こりうる現象を考えた場合は、図3.1-21における⑥の長期的な透水特性の変化と⑦のEDZ（掘削影響領域）に関する特性は、現象として捉えることは難しいと考えられる。

また、①～⑤の現象を引き起こす原因是、セメントの岩盤、地下水、空気との接觸によって引き起こされると考えられ、各事象は、以下のように要約される。

- ・セメントと岩盤との接觸による、セメントの変質（溶脱）
- ・セメントのpH低下による、岩石の変質（強度低下）

したがって、主にセメントの変質とpH低下により発生すると考えられる現象（図3.1-21参照）を確認するために、調査箇所をコンクリート、岩盤、コンクリート／岩盤、地下水に分け計測を実施する。計測項目は、3.2におけるモデル化のための入力値としての利用も考慮し、網羅的に設定する。測定箇所、計測項目、試験方法を一覧にした表を表3.1-20に示す。

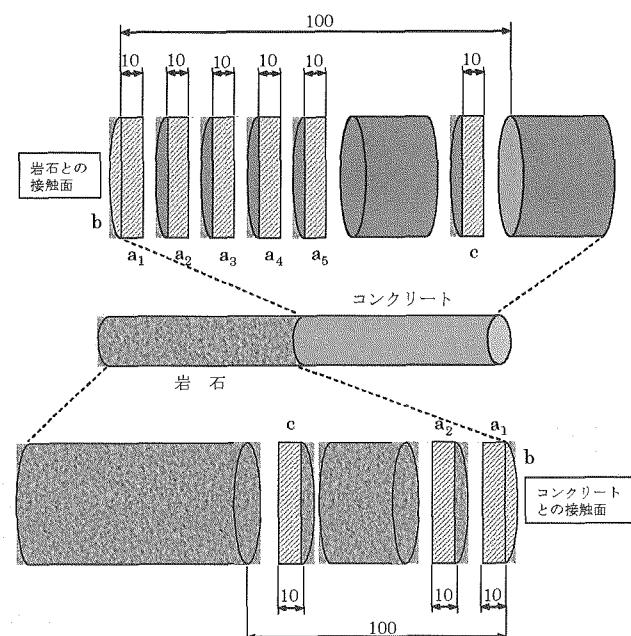
今回の吹付けコンクリートおよび周辺岩盤の化学的影響試験では、図 3.1-21 における①から⑤の事象を考慮した、化学特性、透水特性、力学特性の調査が必要と考えられる。

表 3.1-20 計測一覧表

測定箇所	計測項目	試験方法
コンクリート/岩盤	鉱物	粉末 X 線回折, SEM 熱分析, 湿式分析
	イオン	圧搾法, 滴水分析
	元素	EPMA, 中性化試験
	密度	密度試験,
	空隙分布	水銀圧入試験
	透水係数 拡散係数	透水試験 拡散試験, 電気泳動セル法
地下水 (コアサンプリング孔, 地下水採水装置)	イオン	水質分析

## (2) 計測位置

計測位置は、図 3.1-2 の原位置試験の実施場所 (HFSC ; 化学特性) の側壁において実施する。採取したコア試料の測定・分析内容を図 3.1-22 に示す。



試験方法	コンクリート	岩石
SEM	a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> , a <sub>3</sub> , a <sub>4</sub> , a <sub>5</sub> , b, c	a, b, c
EPMA	a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> , a <sub>3</sub> , a <sub>4</sub> , a <sub>5</sub> , b, c	a, c
XRD	a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> , a <sub>3</sub> , a <sub>4</sub> , a <sub>5</sub> , b, c	a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> , c
TG-DTA	a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> , a <sub>3</sub> , a <sub>4</sub> , a <sub>5</sub> , b, c	a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> , c
圧縮強度	a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> , a <sub>3</sub> , a <sub>4</sub> , a <sub>5</sub> , b, c	a, a <sub>2</sub> , c
MIP	a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> , a <sub>3</sub> , a <sub>4</sub> , a <sub>5</sub> , b, c	a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> , c

図 3.1-22 各試験におけるコア試料測定位置

(3) 施工時の吹付けコンクリートの化学的特性に関する調査<sup>11),12)</sup>

施工時の吹付けコンクリートの化学組成、物理特性、物質移行特性の初期値を得るために、コンクリート/岩盤部において、表 3.1-21 に示す試験方法を用いて、各種計測項目の試験を実施する。

表 3.1-21 吹付時における計測項目

測定箇所	計測項目	試験方法
コンクリート/岩盤	鉱物	粉末 X 線回折、SEM 熱分析、湿式分析
	イオン	圧搾法、滴水分析
	元素	EPMA、中性化試験
	密度	密度試験、 水銀圧入試験
	空隙分布	
	透水係数	透水試験
	拡散係数	拡散試験、電気泳動セル法

## (i) 分析項目

## (a) 粉末 X 線回折

粉末 X 線回折分析により、岩石、コンクリートの構成鉱物を明らかにする。特に、粘土鉱物などの微細な結晶を同定するためには重要な分析方法と考えられる。X 線回折装置の例を図 3.1-23 に示す。

## (b) SEM

走査型電子顕微鏡 (SEM:Scanning Electron Microscope) は、試料表面から発生する二次電子や反射電子を利用して物体表面の微細構造を 10~300,000 倍で立体的な観察や試料の元素分析などが可能である。走査型電子顕微鏡の例を図 3.1-24 に示す。

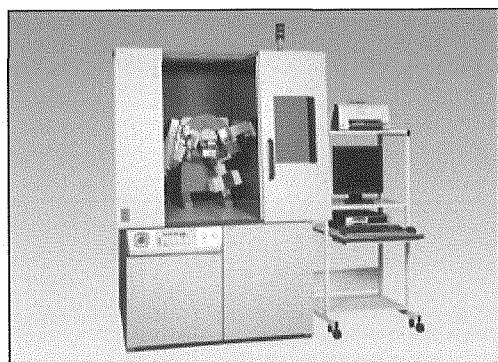


図 3.1-23 X 線回折装置

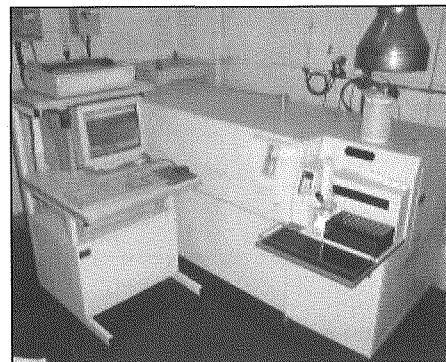


図 3.1-24 走査型電子顕微鏡

## (c) 热分析

熱分析により、水和生成物やその劣化過程の生成相、例えば炭酸化物や塩化物の半定量を行う。熱分析装置の例を図 3.1-25 に示す。

## • TG-DTA

コンクリートの各種成分の定性・定量分析

仕様 測定範囲：室温～1000°C

- DSC

セメント硬化体成分の定性・定量分析や樹脂材料の融解・熱分解の測定

仕様 測定温度範囲：-150°C～725°C

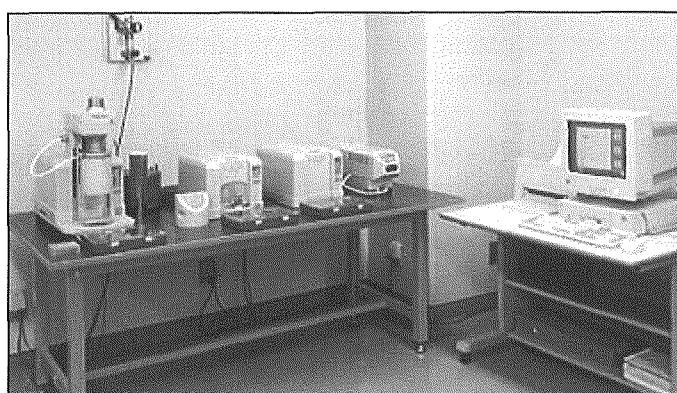


図 3.1-25 熱分析装置

#### (d) 湿式分析

湿式化学分析法は、試薬による試料の溶液化と各種測定方法を組み合わせた手法。試薬による試料の溶液操作は、予備濃縮や化学分離等の前処理（図 3.1-26 参照）を伴う。各種試験方法を表 3.1-22 に示す。分析成分は、Si, Al, S, Na, K, Fe, Ca, Mg, Ca 等である。元素分析に用いられる ICP-AES 装置の例を図 3.1-27 に示す。その他、分析元素の種類や濃度、溶液条件などに応じて、イオンクロマトグラフ (IC), 原子吸光光度計 (AAS), ICP-MS, 各種イオンメータ, 吸光光度計等により、イオンまたは元素濃度の分析を行う。

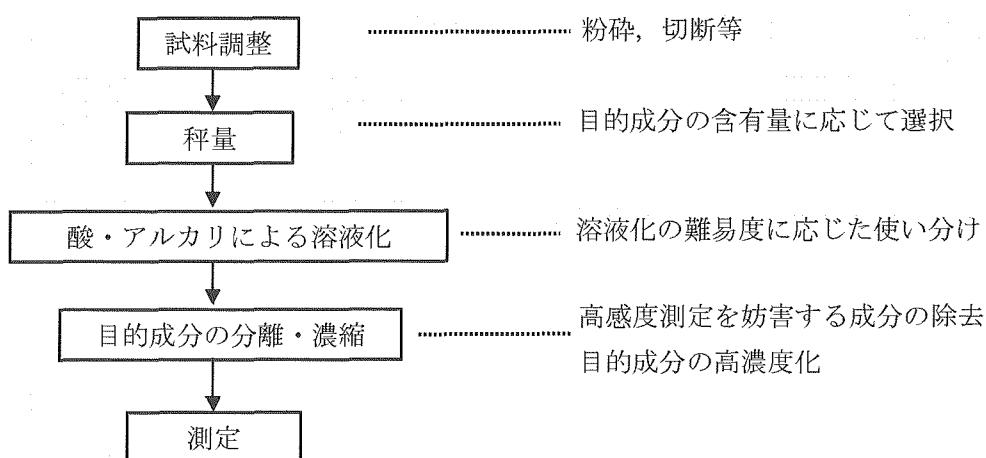


図 3.1-26 湿式分析における前処理のフロー

表 3.1-22 湿式分析における各種分析

分析名	測定方法
重量法	目的成分のみを固体として分離後、その質量測定から含有量を求める
容量法	滴定法、中和滴定・酸化還元滴定・電位差滴定等
吸光光度法	溶液中に存在する成分に特定の光を照射し、濃度に対応した吸収量を測定する方法
原子吸光法	炎や高温雰囲気中で生成した原子蒸気に原子の基底状態から励起させる波長の光を通過させて、原子の数に対応した吸光度を測定する方法
ICP-AES	プラズマ中で元素を発光させ、各元素特有の波長における発光強度を測定する方法
ICP-MS	プラズマ内で生成される元素イオンを質量分析計により測定する方法

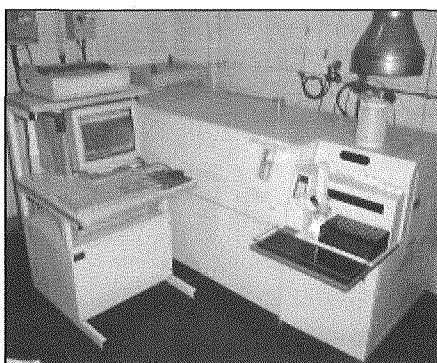


図 3.1-27 ICP-AES 装置

#### (e) 圧搾法および滴水によるイオン分析

コンクリート中の水分のイオン分析のための試料は、圧搾法 (squeezing) による間隙水またはコンクリート表面からの滴水を用いる。図 3.1-28 に圧搾装置の例を示す。試料を装置にセットし、5~10MPa で加圧を行ない、約 20ml の間隙水が採集できた時点での圧搾作業を終了する。分析は後述する水質分析方法により行う。

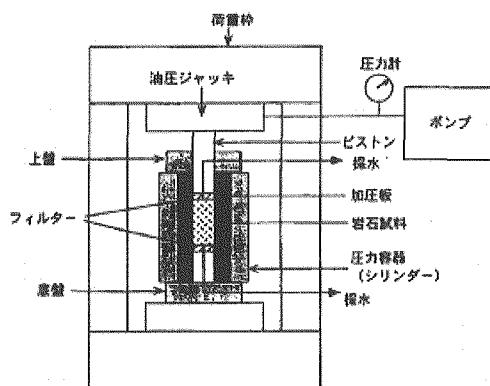


図 3.1-28 間隙水抽出装置の概念図

## (f) EPMA

EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) は、特性X線のスペクトルに注目して、電子線が照射されている微小領域（おおよそ  $1\mu\text{m}^3$ ）における構成元素の検出および同定と、各構成元素の比率（濃度）を分析する装置であり、固体の試料をほぼ非破壊で分析することが可能である。

## ・EPMAによる定性分析

EPMAによる定性分析では、加速電圧・ビーム電流が一定の電子線を試料に照射し、発生した特性X線のスペクトルを測定する。測定を終わったスペクトルはコンピュータによりピーク位置（波長およびエネルギーに相当）の検出が行われ、検出したピーク位置とデータベースに記録されている既知特性X線データとの照合が行われる。照合の結果、複数のピーク位置（特性X線エネルギー）が一致する元素を試料に存在する元素として同定する。

## ・EPMAによる定量分析

EPMAによる定量分析は元素濃度の明らかな標準試料の特性X線強度と、未知試料の特性X線強度とを比較することによって実現する。

基本的には、測定対象となる元素ごとに濃度の異なる複数の標準試料を準備し、それぞれの濃度に於ける特性X線強度を測定して基準値とする。この基準値と未知試料から得られる同じ種類の特性X線強度との比較によって、未知試料の濃度を求める。この分析方法を検量線法と呼び、最も確実で精度の高い定量分析法とされている。EPMA分析装置の例を図3.1-29に示す。

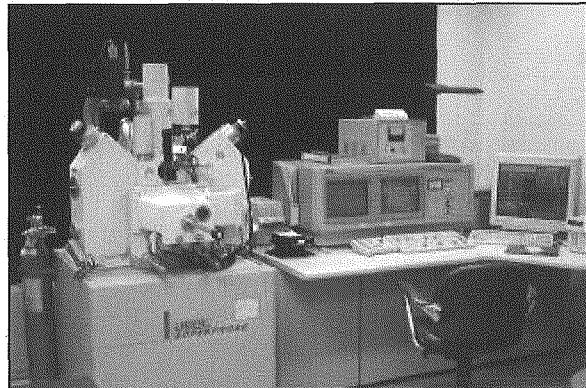


図 3.1-29 EPMA 分析装置

## (g) 中性化試験

コンクリートの中性化は試料にフェノールフタレイン溶液を塗布し、中性化深さを測定する。コンクリートコアによる中性化試験の例を図3.1-30に示す。

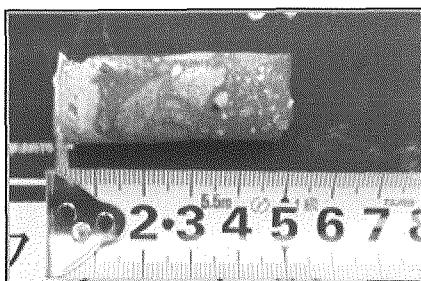


図 3.1-30 コンクリートコアによる中性化試験

## (h) 密度試験

密度を求めるための密度試験は、ノギス法（キャパリー法）によって、円柱状に整形した試料の寸法から体積を算出して、乾燥密度と湿潤（飽和）密度を求める。また、吸水率は乾燥密度・湿潤密度から求める。

## (i) 水銀圧入試験

空隙分布（細孔径分布）を測定するために、水銀圧入試験を実施する。試験には水銀ポロシメータを使用する。水銀ポロシメータは、岩石に対して濡れ性を持たない水銀の注入圧力と細孔径の関係（Washburn の法則）に基づいて、圧力を段階的に上昇させながら、各圧力段階での水銀の浸入量を測定することによって、細孔径の分布を測定する装置である。ポロシメータ試験装置の例を図 3.1-31 に示す。水銀の圧入は、低圧領域は空圧で、高圧領域は油圧で行う構造となっている。細孔径の算出に用いる各圧力段階における水銀の圧入容積は、設定した圧力での平衡時間を 10 秒とし、平衡時間内の平均圧入容積を用いる。

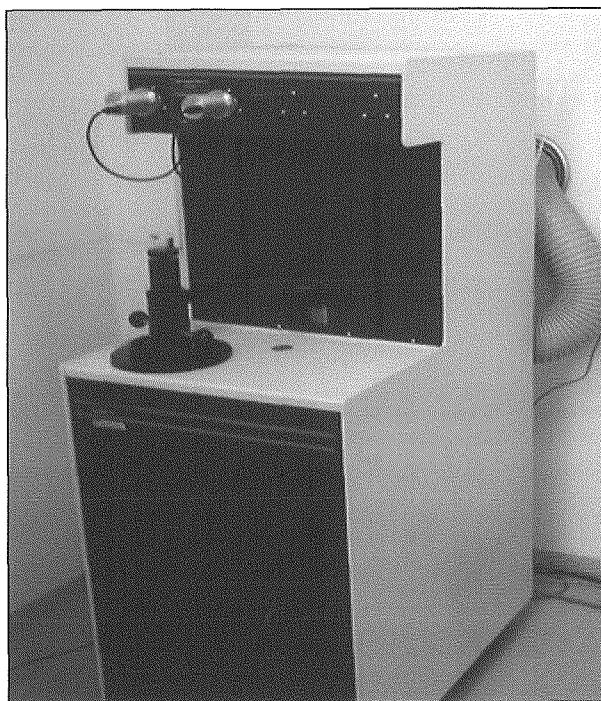


図 3.1-31 水銀圧入型ポロシメータ

### (j) 透水試験

透水係数を求めるために、透水試験を実施する。岩盤や地盤材料の既存の主な室内透水試験法としては、定水位透水試験法、変水位透水試験法、トランジエントパルス透水試験法およびフローポンプ透水試験法がある。一般的に、定水位透水試験法は、比較的高い透水係数( $10^{-2} \sim 10^{-3}$ cm/s)の試験体の試験に用いられ、変水位透水試験法は、比較的低い透水係数( $10^{-8} \sim 10^{-7}$ cm/s)の試験体の試験に用いられている。また、トランジエントパルス透水試験法およびフローポンプ透水試験法は、更に低い透水係数(<10<sup>-7</sup>cm/s)の試験体を試験することができ、難透水性材料に適した試験法である。

### (k) 拡散試験

拡散試験はカラム/セルにセットした岩石中に核種を拡散させ、拡散係数や影響因子などを調べる。拡散係数測定法には、スルーディフュージョン法(透過拡散法)やインディフュージョン法(濃度プロファイル法)がある。スルーディフュージョン法からは実効拡散係数と見掛けの拡散係数を求めることができ、インディフュージョン法からは見掛けの拡散係数を求めることができる。実効拡散係数は定常状態における拡散係数であるのに対して、見掛けの拡散係数は非定常状態における拡散定数である。

### (l) 電気泳動セル法

直流定電圧を用いた電気泳動法により、コンクリート中で定常状態にある塩化物イオンの実効拡散係数を求める。

塩化物イオンを含む溶液と含まない溶液で挟まれたコンクリート供試体の両側に直流を印加すると、負電荷を持つ塩化物イオンはコンクリートの細孔中を通って陽極側へ電気泳動する。この陽極側の塩化物イオン濃度の増加割合が一定に達したとき、細孔中の塩化物イオンは定常状態であるとし、その時の移動流束をもとに、電気化学法(Nernst-Planckの式)を適用して実効拡散係数を求める。電気泳動ユニットの例を図3.1-32に示す。

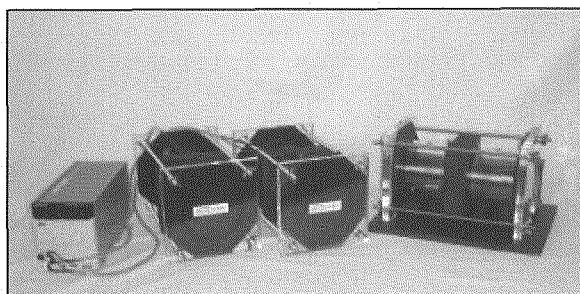


図 3.1-32 電気泳動ユニット

### (ii) サンプリング

#### (a) コンクリート/岩盤コアの採取

試験用コアは、図3.1-2の原位置試験の実施場所(HFSC；化学特性)の側壁から採取する。

コアは、コンクリートと岩芯を含め 40cm 程度とし、数量は試験項目の種類と数量により決める。サンプリングはコンクリートと地質の状況を確認しながら行い、コアの採取はコアドリルを用いて行う。装置は、アンカー等で動かないようにしっかりと固定し、ビットに送水しながら掘削を行う。コアドリルの例は図 3.1-9 に示すとおりであり、その仕様例を表 3.1-23 に示す。

表 3.1-23 コアドリル仕様表

型式	CD-100 型
動力	3 相 200V50Hz
出力	高周波モーター 12000rpm
機械寸法	180W × 600L × 1100H
重量	45kg/set
使用冷却水	q=10~20ℓ /min
切断能力	削孔径 $\phi$ 350 まで

## (b) 試料調整

採取されたコアは、その周りを順にラップ、アルミホイル、さらしで巻いた後、パラフィンで固定して、運搬時に破損しないよう保護する。

## (4) 吹付け部分の化学特性評価モニタリング

吹付け部分の化学特性評価のために、コンクリート/岩盤部分の化学組成、物理特性、物質移行特性を経時的に調査する。

## (i) 分析

分析項目は、吹付け時に実施する分析項目と同じとする。表 3.1-24 に分析項目と分析方法を示す。

表 3.1-24 吹付け部分の化学特性評価モニタリングにおける計測項目

測定箇所	計測項目	試験方法
コンクリート/岩盤	鉱物	粉末 X 線回折、SEM 熱分析、湿式分析
	イオン	圧搾法、滴水分析
	元素	EPMA、中性化試験
	密度	密度試験、
	空隙分布	水銀圧入試験
	透水係数	透水試験
	拡散係数	拡散試験、電気泳動セル法

## (ii) サンプリング

サンプリングは表 3.1-1 に示すように、1, 3, 5, 7, 10 年目に実施する。サンプリングはコアドリルを用いて行い、コンクリート/岩盤コアを採取する。コアは、コンクリートと岩芯を含め 40cm 程度とし、数量は試験項目の種類と数量により決定する。

### (5) 周辺地質・地下水環境モニタリング

周辺地質・地下水環境モニタリングのために、コンクリート/岩盤、地下水の化学組成、物理特性、物質移行特性を経時的に調査する。

#### (i) 分析項目

分析項目を表 3.1-25 に示す。分析項目は地下水を除き、吹付け時と同じ項目とする。

表 3.1-25 周辺地質・地質環境モニタリングにおける計測項目

測定箇所	計測項目	試験方法
コンクリート/岩盤	鉱物	粉末 X 線回折, SEM 熱分析, 湿式分析
	イオン	圧搾法, 滴水分析
	元素	EPMA, 中性化試験
	密度	密度試験,
	空隙分布	水銀圧入試験
	透水係数	透水試験
地下水(コアサンプリング孔、地下水採水装置)	拡散係数	拡散試験、電気泳動セル法
	イオン	水質分析

#### (ii) 地下水の水質分析

##### (a) 水質分析の測定項目

水質分析の測定項目を表 3.1-26 に示す。

表 3.1-26 水質分析測定項目（案）

測定分析項目	測定方法
pH, EC, Temp, DO	JIS K0102.12.1, K0102.13, K0102.7, K0102.32.3
Eh	衛生試験法
Na <sup>+</sup>	JIS K0102.48.3 (イオンクロマトグラフ法)
K <sup>+</sup>	JIS K0102.49.3 (イオンクロマトグラフ法)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	JIS K0102.42.5 (イオンクロマトグラフ法)
Ca <sup>2+</sup>	JIS K0102.42.5 (イオンクロマトグラフ法)
Mg <sup>2+</sup>	JIS K0102.42.5 (イオンクロマトグラフ法)
Mn	JIS K0102.56.4 (ICP-AES)
Fe <sup>2+</sup>	JIS K0102.57.1 備考 (比色法)
Total Fe	JIS K0102.57.1 (比色法)
Silica	JIS K0101.44.1.2 (比色法)
Al	JIS K0102.58.4 (ICP-AES)
F	昭和46年12月環境庁告示59号 (イオンクロマトグラフ法)
B	昭和46年12月環境庁告示59号 (ICP-AES)
Cl <sup>-</sup>	JIS K0102.35.3 (イオンクロマトグラフ法)
Br <sup>-</sup>	JIS K0102.35.3 (イオンクロマトグラフ法)
I <sup>-</sup>	JIS K0102.35.3 (イオンクロマトグラフ法)
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	JIS K0102.43.2 (イオンクロマトグラフ法)
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	JIS K0102.43.1 (イオンクロマトグラフ法)
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	JIS K0102.41.3 (イオンクロマトグラフ法)
硫化物イオン (S <sup>2-</sup> )	JIS K0102.39.1 (比色法)
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	JIS K0102.46.1.1 (イオンクロマトグラフ法)
U	水道法 (ICP-MS)
アルカリ度	JIS K0102.15.1 (滴定法)
全無機炭素	JIS K0102.22.1 (赤外線吸収法)
全有機炭素	JIS K0102.22.1 (赤外線吸収法)

## (b) 測定機器

測定機器を表 3.1-27 に示す。

表 3.1-27 測定機器一覧（その 1）

測定機器	細目	型式	仕様	数量	摘要
滴定装置	ガラスビューレット	宮原製	容量：10ml 一目盛：0.5ml	1 式	
	卓上型 pH 計	堀場製作所製 D-21	ガラス電極法 表示範囲：pH2.00～16.00	1 式	
	pH 電極	堀場製作所製 9610-10D	防水圧膜電極 pH:0～14	1 本	予備 1 本
	マグネットスターラ	TR-300		1 式	
紫外可視分光光度計	島津製作所製 UV-1200		測定波長範囲：200～1100nm スペクトルバンド幅：5±0.5nm	1 台	
イオンクロマトグラフ	送液ユニット	島津製作所製 LC-10AD	流量設定範囲：0.001～5ml/min(1.0～39.2MPa) 5.001～9.999ml/min(1.0～19.6MPa) 圧力設定範囲：1.0～39.2MPa	3 台	
	カラムオーブン	島津製作所製 CTO-10A	温度制御範囲：室温～10°C～80°C 温度設定範囲：4°Cから 80°C (1°Cステップ)	3 台	
	電気伝導度検出器	島津製作所製 CDD-10A	レンジ：1～512 ゲイン：0.1～10μS/cm	3 台	
	陽イオンカラム	島津製作所製 Shim-pack IC-C3	長さ：100mm 内径：4.6mm	1 本	予備 1 本
	陰イオンカラム	島津製作所製 Shim-pack IC-A3	長さ：150mm 内径：4.6mm	各 1 本	予備 1 本
	ガードカラム	島津 IC-GA3 島津 IC-GA1 島津 IC-GC3	PEEK 製	各 1 本	予備 2 本
	インジェクタ	島津製作所製 7725I	一般分析用インジェクタ マニュアル方式	3 台	
	オートサンプラー	島津製作所製 AOC-20A		3 台	
	データ処理	島津製作所製 クロマトパック C-R7Aplus	クロマト用データ処理装置 プリンタプロッタ、ディスクドライブ、液晶モニタ、 フルキーボード装備 波形処理パラメータの変更可	3 台	
分析計 有機炭素	TOC 計	島津製作所製 TOC VSCH	燃焼・非分散形赤外線ガス分析法燃焼温度： 680°C(白金触媒)	1 台	
	空気導管セット		減圧、調圧器付	1 式	
	高純度空気ボンベ		酸素：21%	1 本	
ICP-MS	島津製作所製 ICPM-8500		分析部：四重極型質量分析計 検出部：チャンネルトロン検出部 高周波出力：0.2～1.2KW	1 台	4 段階

表 3.1-27 測定機器一覧（その2）

測定機器	細目	型式	仕様	数量	摘要
原子吸光分析計	島津 AA-6650G	測定波長範囲：190～900nm バンド幅：0.1～5.0nm 6段階 加熱温度：室温～3000°C		1台	
質量分析計	Europa 社 Geo 20·20			1台	
質量分析計	VG 社 Micromass602			1台	
液体シンチレーションカウンター	アロカ社 LSC-LBIII			1台	
測定環境機器類	電子天秤	島津 BL-3205	秤量範囲：320g	1式	
	吸引ろ過器セット	東洋濾紙	直径：90mm	1式	
	加圧ろ過器セット			1式	ディスクフィルター+注射器
	アスピレーター	ヤマト WP-15		1式	
	冷蔵庫			1式	
測定備品	実験台			1式	事務机、長机など
	棚（器具保管用）			1式	
	マイクロシリンジ			1式	
	ピペット			1式	
	メスフラスコ			1式	
	ビーカー			1式	
	ロート			1式	
	その他消耗品			1式	

**(c) 精度管理方法**

蛍光光度法、比色法、赤外線吸光法、ICP-MS 法、ICP-AES 法、電気加熱・原子吸光法測定、ガスクロマトグラフ法においては、測定日に1回、標準溶液について所定の操作により検量線を作成、測定して精度管理を行う。

アルカリ度については、測定日に1回、pH計の校正を実施する。

**(d) 定量下限値の設定方法**

現場分析室において検量線作成時の最低濃度（定量下限値付近）の標準溶液について、所定の操作により5回測定して標準偏差を算出する。定量下限値は、検量線の最低濃度と標準偏差の10倍の高い方の値を、定量下限の報告値とする。

検出下限値は、標準偏差の3倍とし、検出下限値以上で定量下限値未満の値は参考値として日報に表示する。ただし、精度に関しては、保証の限りではない。

検出下限値未満の時は、ND（未検出）表示とする。なお、イオンクロマトグラフ法においては、低濃度域の測定は低濃度用検量線を作成して濃度を算出する。

アルカリ度は、滴定量の最小目盛である0.1 ml (0.02 meq/l に相当) に、容量器具の精度、温度の影響、読みの誤差などを考慮して、最小目盛の3倍である0.06 meq/l を定量下限値とする。

各測定項目の目標定量下限値を表 3.1-28 に示す。

表 3.1-28 測定値の有効数字と最小表示桁数

分析項目	分析方法	目標定量下限値 ( $\mu\text{ g}/\text{mL}$ )	有効数字 桁数	最小表示桁数
pH	電極法	—	<10 2桁 >10 3桁	小数第1位
EC	電極法	1mS/m	2	小数第1位
Temp	標準温度計	—	<10 2桁 >10 3桁	小数第1位
DO	電極法	0.1	2	小数第1位
Eh	電極法	—	整数	整数第1位(絶対値)
Na <sup>+</sup>	イオンクロマトグラフ法	0.1	2	小数第1位
K <sup>+</sup>	イオンクロマトグラフ法	0.2	2	小数第1位
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	イオンクロマトグラフ法	0.2	2	小数第1位
Ca <sup>2+</sup>	イオンクロマトグラフ法	0.2	2	小数第1位
Mg <sup>2+</sup>	イオンクロマトグラフ法	0.1	2	小数第1位
Mn	比色法	0.1	2	小数第1位
	ICP-MS	0.001	2	小数第3位
Fe <sup>2+</sup>	比色法	0.05	2	小数第3位
T-Fe	比色法	0.05	2	小数第2位
	電気加熱-AA 法	0.001	2	小数第3位
Si	比色法	0.1	2	小数第1位
Al	比色法	0.1	2	小数第1位
	ICP-MS	0.001	2	小数第3位
F <sup>-</sup>	イオンクロマトグラフ法	0.1	2	小数第1位
B	ICP-AES	0.01	2	小数第2位
Cl <sup>-</sup>	イオンクロマトグラフ法	0.1	2	小数第1位
Br <sup>-</sup>	イオンクロマトグラフ法	0.1	2	小数第1位
I <sup>-</sup>	イオンクロマトグラフ法	0.7	2	小数第1位
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	イオンクロマトグラフ法	0.3	2	小数第1位
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	イオンクロマトグラフ法	0.2	2	小数第1位
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	イオンクロマトグラフ法	0.4	2	小数第1位
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	イオンクロマトグラフ法	0.5	2	小数第1位
硫化物イオン (S <sup>2-</sup> )	比色法	0.01	2	小数第2位
全無機炭素	赤外線吸収法	1	2	小数第1位
全炭素	赤外線吸収法	1	2	小数第1位
全有機炭素	赤外線吸収法	—	2	小数第1位

## (e) 測定データの確認

測定担当者は試料中に含まれる主要陽イオンと主要陰イオンについて meq/L で表した数値の和を計算する。また、生データのデータシートへの転記ミスの有無、日付、測定担当者の記載ミスの有無を確認する。さらに、誤記、脱字等の有無を確認し提出する。

(f) イオンバランスの確認<sup>13)</sup>

各測定項目において、測定値に明らかな異常値が出た時やイオンバランスが下記計算式①、②、③で示した範囲に入らない時は、再測定などの措置をとる。また、再測定用試料として現場測定項目の測定結果提出後 1 週間、試料を冷蔵庫に保存する。

①  $\Sigma$  陰イオンが 0~3.0 meq/l のとき

$$\Sigma \text{陽イオン} - \Sigma \text{陰イオン} = \pm 0.2 \text{ meq/l 以内}$$

②  $\Sigma$  陰イオンが 3.0~10.0 meq/l のとき

$$\frac{\Sigma \text{陽イオン} - \Sigma \text{陰イオン}}{\Sigma \text{陽イオン} + \Sigma \text{陰イオン}} \times 100 = \pm 2 \% \text{ 以内}$$

③  $\Sigma$  陰イオンが 10.0~800 meq/l のとき

$$\frac{\Sigma \text{陽イオン} - \Sigma \text{陰イオン}}{\Sigma \text{陽イオン} + \Sigma \text{陰イオン}} \times 100 = \pm 2 \sim 5 \% \text{ 以内}$$

### (g) 測定値の有効数字

測定値は、分析過程の誤差や精度などを考慮して、有効数字の桁数を決める。有効数字の桁数は、分析方法の種類、使用機器や器具、分析試料量、分析項目の量、分析操作上の誤差などの要素により決定される。

また、必要以上に低い数字まで表示しても、測定値の信頼性が低下することになるため、定量下限値より最小表示桁数を決定する。なお、分析値を取得するため化学分析速報に参考値として、検出下限値までの分析データを表記する。また、速報ではイオンバランスを確認するため有効数字桁数による表示ではなく、全ての項目について最小表示桁数まで表示する。

### (h) 分析測定機器の管理

測定装置の異常の有無を、設備・機器動作確認表に記載する。異常が発生した場合は、装置の異常箇所、復旧予定日および復旧までの分析対応方法を速やかに報告する。

### (i) 分析測定方法の管理

分析操作手順確認表により各試料において必要な分析項目が正しい操作で測定されているかを確認する。

### (j) 進捗状況の管理

各試料の分析進捗状況、予定を分析試料進捗確認表により管理、把握し、採水後、速やかに分析に着手し、結果を報告する。

#### (iii) コアサンプリング孔からの採水

##### (a) 分析頻度

分析には 1, 3, 5, 7, 10 年目に実施するコアサンプリング孔から採取した地下水を用いる。

**(b) 採水作業**

コアサンプリング孔から湧水する地下水を採水する。分析用試料は、硝酸、超純水で洗浄したポリ容器に採水する。容器には、試料名、採取年月日、採取者名、試料の観察結果（濁り、臭い、気泡の有無）を記入してラベルを貼り管理する。

**(c) 水質分析**

水質分析は、(ii)地下水の水質分析に準ずる方法で実施する。

**(iv) 地下水採水装置からの採水**

周辺地質中の地下水の水質変化を調べるために、ボーリング孔を掘削し、そこで地下水を定期的に採取し水質分析を行なう。

**(a) 分析頻度**

水質分析は、装置設置後 6 ヶ月間は週 1 回、その後は 3 回/年の頻度で実施する。

**(b) ボーリング孔掘削**

ボーリング孔の掘削は、コアサンプリング箇所近傍の側壁において実施する。ボーリング孔は、ボーリングマシンを用いて、壁面に対して水平やや上向きで掘削する。掘削はコアボーリング（孔径 66mm を想定）とし、掘削はコア観察により、孔内の地質状況を把握しながら行う。掘削深度、掘削孔径は、調査地点の地質状況、設置する採水装置の仕様により決める。図 3.1-33 にコアボーリングの概念図（鉛直掘削）を示す。試錐機の例を図 3.1-34 に、その仕様を表 3.1-29 に示す。試錐ポンプの例を図 3.1-35 に、その仕様を表 3.1-30 に示す。コア採取に用いるトリプルコアバレルの例を図 3.1-36 に示す。

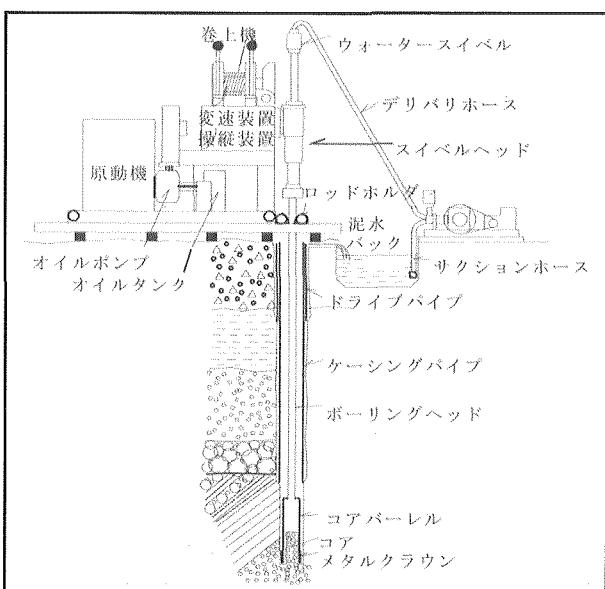


図 3.1-33 コアボーリング掘削概念図（鉛直掘削）

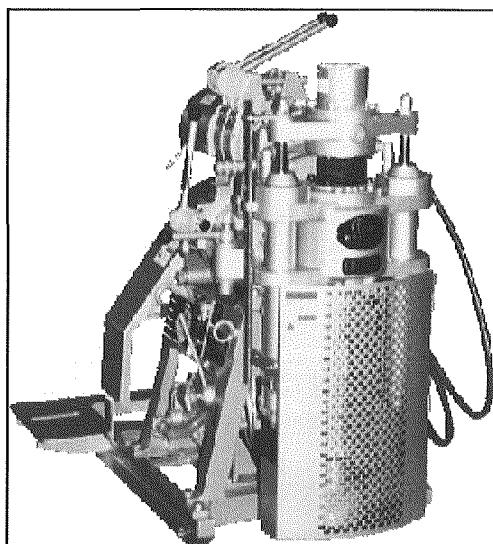


図 3.1-34 試錐機

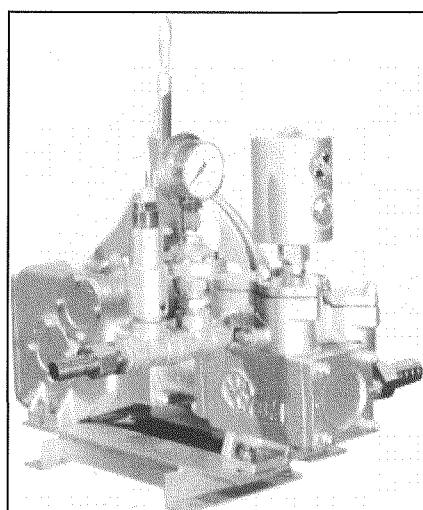


図 3.1-35 試錐ポンプ

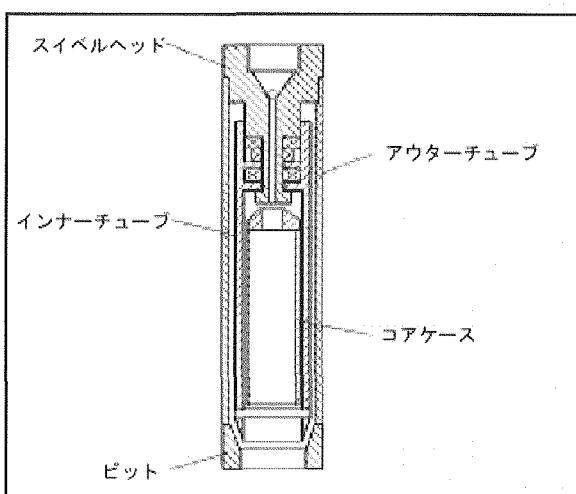


図 3.1-36 トリプルコアバーレル

表 3.1-29 試錐機仕様表 (YBM-05DA2)

穿孔能力	
呼称深度	50 m
40.5mm ロッド	110 m
41.3mm ロッド	80 m
EW ロッド	120 m
スイベルヘッド	
スピンドル内径	43 mm
スピンドルストローク	500 mm
スピンドル回転数	57, 110, 225 rpm (A シリーズ)
最大給圧力	21.8 kN (2,220 kgf)
最大バランス力	27.0 kN (2,750 kgf)
スピンドルトルク	607.6 N・m (62 kgf・m) A シリーズ
変速機	
変速機	3 段変速スライディングギヤ
ホイスト	
形式	プラネタリギヤ式ハンドブレーキ
ドラム容量	9 mm DIA. x 20 m
ドラム能力	4.9 kN (500 kgf)
ロープスピード	15~58 m/min(A シリーズ)
原動機	
所要動力	3.7 kW (5PS)
質量	
総質量(原動機を除く)	280 kg
最大分解質量	52 kg

表 3.1-30 試錐ポンプ仕様表 (GP-5)

形式	単筒複動ピストンポンプ
理論吐出量	50 l/min
最大吐出圧力	2.0 MPa (20 kgf/cm <sup>2</sup> )
吸入口径	38 mm (1-1/2")
吐出口径	25 mm (1")
本体寸法	685 mm (L) x 297 mm (W) x 486 mm (H)
本体質量	60 kg
総寸法 (ベース付)	約 1,500 mm (L) x 400 mm (W) x 500 mm (H)

### (c) 地下水採水装置

地下水採水装置の概念図を図 3.1-37 に示す。表 3.1-31 にその基本仕様を示す。装置は、ロッドを固定する口元のメカニカルパッカー、採水区間を区切るパッカー、パッカーを連結するロッドと採水用の採水チューブで構成される。採水チューブの太さ、採水区間についての詳細は、地質状況、被圧水の圧力等により決定する。

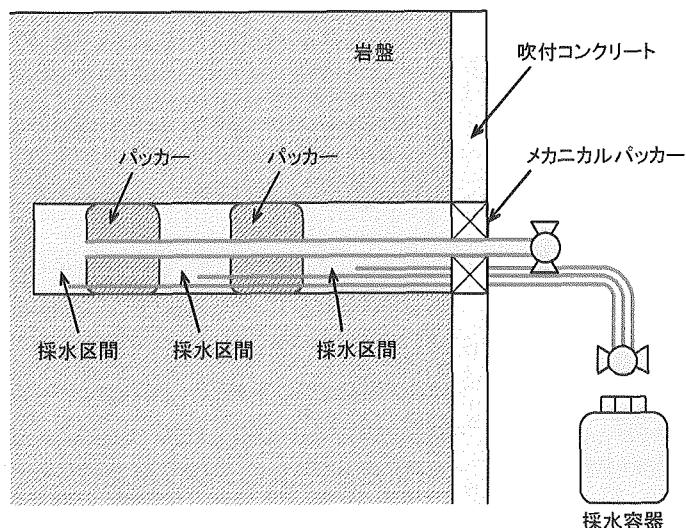


図 3.1-37 採水装置概念図

表 3.1-31 採水装置基本仕様（水質モニタリング対応型）

項目	基本仕様
基本構成	①ボーリング孔内パッカーシステム部 ②坑道モニタリング部
最大適応孔径	φ 100mm
最大使用環境圧力	10MPa
モニタリング区間調整長さ	50cm～200cm (50cm ピッチ)
ボーリング孔内 パッカーシステム部最大外径	φ 90mm
最大パッカー連装数	6連装
最大モニタリング区間数	6区間 (口元～第1パッカー区間込で11区間)
測定項目	各モニタリング区間の間隙水圧および排水量, 各パッカー拡張圧, 1区間のpH, Eh/ORP, EC, DO, Temp, Cl <sup>-</sup>
パッカー最大遮水差圧	10MPa
パッカー拡張・収縮	個別拡張・収縮 片側スライド式
パッcker拡張方式	水圧式
データ収録項目	各モニタリング区間の間隙水圧, 1区間のpH, Eh/ORP, EC, DO, Temp, Cl <sup>-</sup> イオン4項目
配管切り替え	プログラム運動型 (一部手動式)

## (d) 採水作業

採水は、装置設置後6ヶ月間は週1回、その後は3回/年の頻度で実施する。分析用試料は、硝酸、超純水で洗浄したポリ容器に採水する。容器には、試料名、採取年月日、採取者名、試料の観察結果（濁り、臭い、気泡の有無）を記入したラベルを貼り管理する。

## (e) 分析

水質分析は、(ii) 地下水の水質分析、に準ずる方法で実施する。

### 3.2 コンクリートが周辺地質環境へ与える影響の評価手法の構築

HFSC を用いた低アルカリ性コンクリート施工試験の目的の 1 つは実際の地質環境中に設置した低アルカリ性コンクリートの支保材料が、その周辺の地質環境に与える影響を把握し評価する手法を構築することであり、平成 18 年度はその手法の構築に向けた検討を実施した。

岩盤と接触したコンクリートが周辺地質環境に与える影響を評価するために、そのモデル化の考え方や手法を概括的に整理した。本原位置試験の地質環境を対象とした適用性に関しても検討しているが、実際に適用していくには本原位置試験の条件、期間、規模などを考慮した検討が必要である。

#### 3.2.1 コンクリートが周辺地質環境へ与える影響の評価のためのモデル化の考え方や手法などの整理

セメント（コンクリート）の周辺地質環境への影響についての評価は、

- ・ どの程度の時間スケールおよび空間的スケールにおいてどのような化学的変質が母岩中で生じるか？
- ・ 岩石の化学的変質が生じた場合、その結果として母岩の天然バリア性能はどの程度影響されるのか？

という 2 つの側面について行われる必要がある。ここでは、図 3.2-1 に検討の手順を示すとともにこれらとのそれぞれの項目について評価手法を整理する。

##### (1) 考慮すべき影響の種類

###### (i) 岩石の化学的変質

低アルカリ性セメントであるHFSCの場合でも、空隙水のpHは 11 近傍にまで上昇する<sup>14)</sup>。このようなアルカリ性の条件では、シリカの支配的な液相化学種が  $\text{SiO}_2(\text{aq})$  から  $\text{HSiO}_3^-$  あるいは  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$  へと変化することに伴い、通常の地質環境で見られる多くのケイ酸塩鉱物は熱力学的に不安定となり、溶解するものと予想される。ここでは、以下に、処分場閉鎖後の長期的安全性、特に、放射性核種移行に対する母岩の天然バリア性能の観点から、HFSC の反応によって生じる比較的高いpHの空隙水の影響を整理する。

###### ・ 吹付けコンクリート周辺における反応

坑壁への吹付けコンクリート等として HFSC を用いる場合にも、コンクリート直近の pH の高い部位では Ca 含有率の高い CSH 鉱物が生成し、下流側に行くに従い徐々に pH が低下するとともに、Ca 含有率の低い CSH、そして、ゼオライトが分布するものと考えられる。

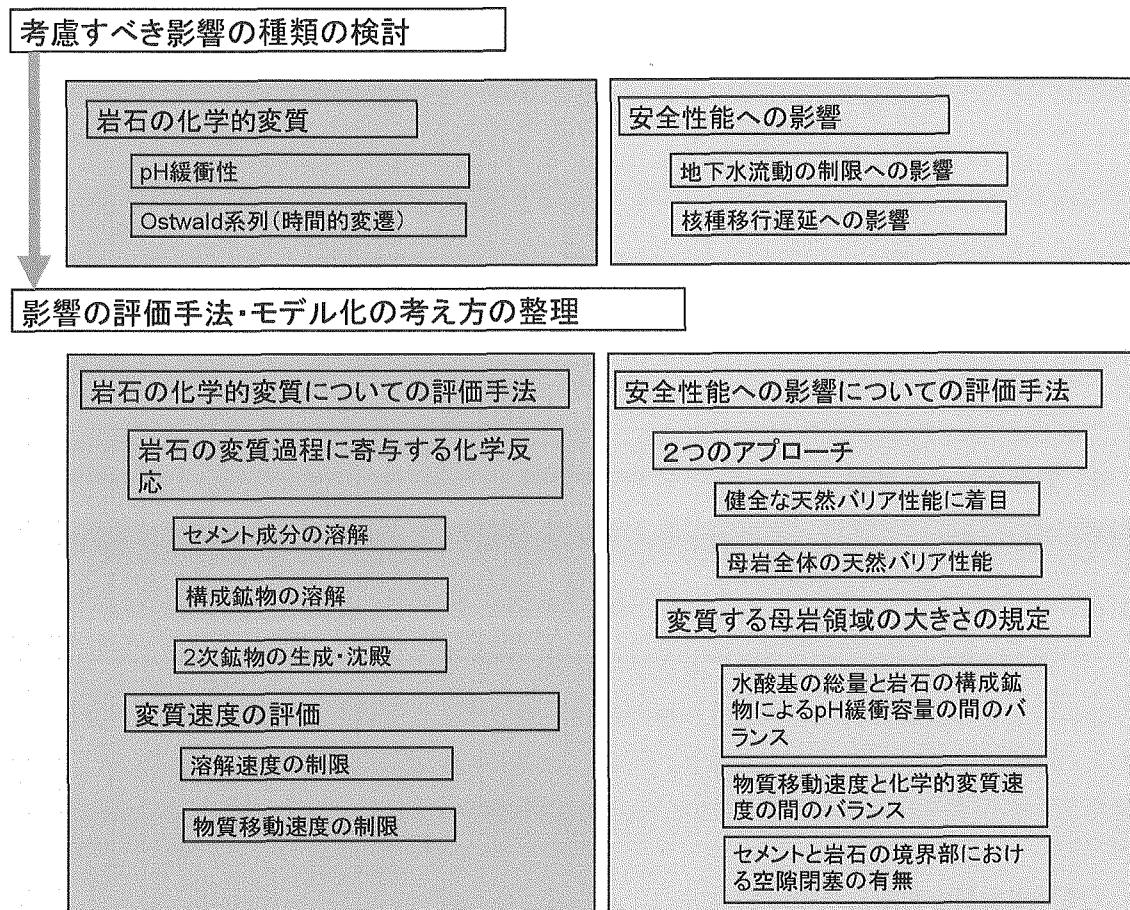


図 3.2-1 コンクリートが周辺地質環境へ与える影響の評価の検討手順

#### ・ Ostwald 系列（時間的変遷）

自然界における鉱物の生成においては、Ostwald系列と呼ばれる傾向が知られており、一般に、ある環境で熱力学的に最も安定な鉱物の生成エネルギーは大きく反応速度も遅いために、これらの鉱物が直接的に生成することは極めて稀であり、比較的短期のうちには準安定な鉱物が沈殿し、これらが長期的により安定な鉱物へと変遷していくものと考えられる。アルカリ性の条件におけるケイ酸塩鉱物の溶解は、液相中にSiやAl等を供給するとともに、特に前述したシリカの分種化によって水酸基が消費されるため、pHを低下させる効果（pH緩衝性）を示すこととなる。また、液相中に供給されたSiやAl等はCSHやCASHあるいはゼオライトや長石等の二次鉱物として沈殿する<sup>15)</sup>。これらの二次鉱物のうち、CSH系のものは比較的高いpHで生成し、沈殿に際して水酸基を消費することにより岩石を構成するケイ酸塩鉱物のpH緩衝性を助長する傾向があるのに対して、一部のCASHやゼオライトはこれよりも若干低いpHにおいて生成し、また、沈殿に際してはHSiO<sub>3</sub><sup>-</sup>あるいはH<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup>という形態でシリカに付随している水酸基が液相へと回帰する傾向にあるため、結果として、ケイ酸塩鉱物の溶解やCSH系鉱物の沈殿によるpH緩衝性をむしろ阻害するものとなる。Maqarinにおける既往のナチュラルアナログ研究では、アルカリのソースから下流側に向けてpHが徐々に低下するような場において、pHの特に高い部位ではCa含有率の高いCSHが生成しており、その直近にはCa含有率の低いCSHが、そして、下流側の

比較的pHの低い部位ではゼオライトが生成するというような空間的な配列を示しており、pHの時間および空間的な変化（低下）に追随するように異なる種類の鉱物が順次安定となってはその後再び不安定となって溶解するという変遷の系列を呈することが知られている<sup>15)</sup>。実際、ベントナイト等の粘土鉱物中に高アルカリの溶液を通水する実験では、二次鉱物として非晶質のCSHゲルが生じていることが観察されており、通常の温度の試験においては結晶性の高いトバモライト等のより安定なCSH系の鉱物が生成するには一定の時間を要することが知られている<sup>12)</sup>。このことは、岩石の変質においても、短期的な試験で観察することの可能な二次鉱物の種類と、数万年という長期的な時間スケールにおいて生成する安定な鉱物は異なる可能性が高いことを示唆している。

## (ii) 安全性能への影響

母岩に期待される天然バリア性能は、放射性核種が地層中を移行して地表近傍の生物圏に回帰するまでの時間を増大させることにより、その間に放射性核種の崩壊によって毒性が低下することを期待するものである。また、天然バリア性能は、

- ・ 地下水流速が遅いこと（地下水流动の制限）
- ・ 岩石への収着によって放射性核種の移行が地下水よりもさらに遅延されること（核種移行遅延）

に依拠するものと言うことができる。

### (a) 「地下水流动の制限」への影響

地下水流动の制限は、主に母岩の透水性が小さいことによるものであり、亀裂を有する岩盤においては、亀裂の頻度が小さいこと、そして個々の亀裂の開口幅が小さく透水量係数が小さいことが重要となる。また、マトリクス部自体を通じて地下水の流れのある場合には、空隙率および空隙径が小さく透水係数が小さいことが重要となる。この「地下水流动の制限」という天然バリア性能の観点から上述したアルカリ性空隙水の岩石への影響を検討すると、以下に述べる潜在的な影響機構を想定することができる。

#### ① 亀裂等への影響

既存の亀裂表面において、アルカリ性の地下水との反応により、ケイ酸塩鉱物が溶解し、亀裂の開口幅が増加して透水量係数が上昇する可能性がある。平行平板の理想的な形状を仮定した場合、亀裂の透水量係数は開口幅の三乗に比例することが理論的に知られているが、亀裂表面の凹凸や粗度といった現実的な形状を考慮した場合には、透水量係数は開口幅の二乗に比例することを示すという経験的な法則が知られている<sup>16)</sup>。また、この経験則は、複雑な形状の流路においてナビエ・ストークスの方程式を数値的に解析した研究例<sup>17)</sup>においても検証されつつある。一方、前述した二次鉱物の沈殿は、むしろ逆に、亀裂の開口部を充填する傾向にあるため、開口幅および透水量係数を低下させる可能性もある。このため、アルカリ性地下水の影響としては、これら2つの競合する機構が相殺した後に、どちらが正味の影響をもたらすものとなるかが重要となる。そして、このような競合の様相は、空間的配置によって異なり、また時間的にも異なる。即ち、

空間的配置によって、コンクリート直近の比較的pHが高くCa含有率の高いCSH鉱物が主として生じる部位と下流側のpHがより低くゼオライト等が生じる部位とでは亀裂の開口あるいは閉塞のどちらが支配的となるかが異なる可能性、および時間的には初期に生じる準安定の鉱物は一般に大きな（単位モルあたりの）体積を示すのに対して、より安定な鉱物は緻密なものである場合が多いため、同じ位置においても時間スケールによって亀裂の開口と閉塞のいずれが支配的となるかは異なる可能性がある。

## ② マトリクス内の空隙への影響

マトリクスの内部空隙においても、上記の亀裂の場合と同様に空隙の拡大（基質の溶解）と閉塞（二次鉱物の沈殿）の両方が生じるため、これら2つの過程の競合の結果、正味の影響として透水係数の上昇あるいは低下が生じる。そして、この場合においても、その影響の方向と程度とは空間的にも時間的にも異なる可能性がある。マトリクス内部の空隙がバルクの透水係数に与える影響については、亀裂の場合ほどには定量的な検討が進んでいない。特に、アルカリ性の地下水との反応によって基質が溶解する場合には、これまで近傍の他の空隙から孤立しており地下水の流動に全く寄与していないかった空隙（いわゆる dead-end pore）が、近隣の空隙との間を遮断していた鉱物の溶解によって周囲と連続するようになるといった本質的に非線形なプロセスが含まれるものと考えられる。

以上の一般的な天然バリア性能に加えて、本検討の対象とする坑道近傍のニアフィールド母岩は、人工バリア中の核種移行に対する外側境界条件という位置づけも有している。この観点からは、以下の潜在的な影響機構が想定される。

## ③ 人工バリア外側境界条件への影響

坑道の直近に位置する母岩は、アルカリ性の地下水との反応による化学的変質が最も顕著に生じる部位であり、上述した2つの効果の結果、正味の透水係数の増大が生じた場合には、いわゆる掘削影響領域に該当する坑道の周囲の高透水性部分の透水性がさらに増大することとなり、地下水が人工バリアの外側境界を流れ、緩衝材から拡散によって移行する放射性核種を散逸させることによって緩衝材中の核種の濃度勾配を増大させることとなる。他方、正味の透水係数の低下が生じる場合には、掘削影響領域を通過する地下水流量は減少することとなり、人工バリアからの核種移行率は低減される可能性がある。

### (b) 核種移行遅延への影響

岩石の変質によって生じると考えられるCSH系やCASH系の鉱物あるいはゼオライトの核種吸着性能についての研究事例は限られており、このため、変質後の岩石の核種移行遅延性能が当初のものよりも低下するか否かについての知識には大きな不確実性が含まれている。また、仮に、アルカリ性溶液の通水試験によって変質した岩石を用いて核種の吸着試験を実施したとしても、このような短期的かつ小規模の試験において生成する二次鉱物の種類は、前述したpH勾配に追随した二次鉱物の系列およびOstwald系列において時間・空間的に生じる可能性のある多様な鉱

物群の中の一部分に過ぎない可能性が高く、その結果のみを以って変質後の核種移行遅延性能を代表させることは不適切と考えられる。

## (2) 影響の評価手法およびモデル化の考え方

前項に述べたセメントの周辺地質環境への影響についての評価は、3.2.1 の冒頭に挙げているが、

- ・ どの程度の時間スケールおよび空間的スケールにおいてどのような化学的変質が母岩中で生じるか？
- ・ 岩石の化学的変質が生じた場合、その結果として母岩の天然バリア性能はどの程度影響されるのか？

という 2 つの側面について行われる必要があり、ここでは、以下に、これらのそれぞれの項目について評価手法を整理する。

### (i) 岩石の化学的変質についての評価手法

#### (a) 岩石の変質過程に寄与する化学反応の特定

岩石の化学的変質を評価する際には、まず、アルカリのソースとなるセメントの溶解挙動をモデル化することが必要となる。既往の研究例のほとんどはOPCを対象としたものであるが、近年、OPCの溶解モデルの初期条件を変更することによって低アルカリ性セメントの浸出試験を再現する試みが行われている。特に、付録 1 の 1.に示す事例<sup>18)</sup>は、OPCに対する杉山モデルの初期のCa/Si比を低下させることによって、HFSCの浸出試験結果をある程度再現可能であることを示すものであり、本研究におけるコンクリートモデルの構築に当たってもこの事例を参照することが可能と考えられる。

岩石の化学的変質は、構成鉱物の溶解およびこれに引き続いて生じる二次鉱物の沈殿に区分して考えることができ、評価にあたっては、これらの変質過程のそれぞれに含まれる化学反応系を定義することが必要となる。このうち、溶解反応については、まず、鉱物分析によって対象とする岩石中に含まれる構成鉱物を特定し、これらのそれぞれについて、溶解反応を定式化することが必要となる。付録 1 の 2.はベントナイト中の構成鉱物について、それぞれの溶解反応を定義したものであるが、地質環境への影響の評価にあたっては、まず、この例と同様に主要な構成鉱物を特定するとともに、それぞれの溶解反応を定義することが必要となる。

二次鉱物の生成については、鉱物の種類によって、

- ・ 沈殿に伴い水酸基を消費あるいは生成するため、岩石の構成鉱物の溶解による pH 緩衝性に影響（促進あるいは阻害）を及ぼす
- ・ 二次鉱物に含まれる各元素の化学量論係数に応じて、岩石の構成鉱物から溶出した溶質を非調和的に消費することにより、緩衝材間隙水組成に差異が生じる
- ・ モル体積が異なるため、岩石の構成鉱物の溶解によって増大した間隙を充填する効果が異なることから、現実的に生成する可能性のある二次鉱物を同定することが特に重要となるそのため、

- ・ セメントから溶出する Ca やアルカリ金属および pH
- ・ 岩石の構成鉱物の溶解によって液相に供給される Si や Al あるいは他の元素の濃度

に着目して二次鉱物の生じる環境を想定することが必要となる。そして、このような環境は、セメントからの距離と時間によって種々に異なる可能性があることから、付録1の2.に例示するように、環境変遷に関するシナリオを定義することが求められる。また、同じく付録1の2.に示すように、シナリオ上想定されるそれぞれの環境と類似した自然系において実際に生じている二次鉱物についてのナチュラルアナログ研究を参考として、どのような二次鉱物がいつどこで生じる可能性があるかを予測することとなる。なお、ここで述べた予測には情報の不足やナチュラルアナログと処分環境との条件や時間スケールの相違から不確実性が介入することが不可避であり、このため、生成する二次鉱物の系列は一意的には決定されない状況が予想される。このような場合には、それぞれの可能性についてモデル化を行うことによって、不確実性の影響を把握することを試みる必要がある。

### (b) 変質速度の評価

岩石の変質を律速する可能性のある要因としては、以下の2つのが挙げられる。

① 岩石構成鉱物の溶解速度の制限

② セメントから溶出する水酸基や岩石構成鉱物等の溶解生成物の物質移動速度の制限

このうち、①の溶解速度については、それぞれの鉱物についての溶解試験を行うことによってモデル化を行うことが必要となるが、一般に、このような速度論モデルは平衡から離れた状態と平衡に近い状態のそれぞれについて作成することが必要となる。このため、Camaら<sup>19)</sup>のように、通水液中のSiやAl等の濃度を制御することによって対象とする鉱物の溶解反応に対する飽和度を調整することの可能がフロースルー試験を実施することが重要である。

②の溶解生成物の物質移動については、基本的には、対象とする岩石中の核種移行の評価に用いるものと同様のモデルを用いるべきである。しかしながら、この場合の溶質の移動に関する場の特徴は化学反応即ち岩石の化学的変質によって影響される点に留意する必要がある。特に、このような変質に伴う物質移動特性の変化が顕著となるのは、セメントと岩石の境界付近であると予想される。つまり、セメントから溶出する水酸基やCa等の岩石の化学的変質に最も大きな影響を及ぼす溶質の移動速度は、この境界部の変質層の物質移動特性によって顕著な影響を受けると考えられる。そこで、特に境界部における岩石構成鉱物の溶解量およびこれらに代わって生成する二次鉱物の種類と量の観点から変質の程度を表現し、この変質の程度に応じて岩石の実効拡散係数や透水係数がどのように変化するかを予め実験的に把握しておくことが必要である。付録1の4.はベントナイト緩衝材に対して、セメント影響による変質を模擬的に生じさせた場合の物質移動特性の変化を経験的にモデル化した事例である。ただし、ここで、注意すべき点は、前出のOstwald系列等を考慮すれば、短期的な試験で取得される変質部の物質移動特性は、岩石の構成鉱物の溶解と比較的短期のうちに生成する準安定な二次鉱物による空隙閉塞とのバランスによって規定されるものであり、安全評価上重要となる熱力学的により安定で結晶性の高い二次鉱物に変遷した後の物質移動特性との同一性には疑問が残されているということである。このため、このような実験結果に基づく経験的モデルは1つのリファレンスとしては用い得るもの、その不確実性について慎重な検討が求められる。

「セメントからどの程度の距離にある母岩がどの程度の時間スケールでどのように変質するの

か」という問い合わせるために答えるためには、上述した、

- ・セメント溶解、岩石溶解および二次鉱物生成についての化学反応系
- ・岩石溶解および二次鉱物沈殿についての反応速度モデル
- ・物質移動モデル
- ・岩石やセメントおよび特にこれらの境界部の化学的変質に伴う実効拡散係数や透水係数の変化についてのモデル

を統合することによって、多成分反応移動問題の解析を行うことが必要となる。このような解析に用いるツールとしては、「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」<sup>15)</sup>において同様の問題の解析に使用したRaiden 3（付録1の5.参照）のようなモデルを用いることが適当と考えられる。

## (ii) 安全性能への影響についての評価手法

### (a) 安全性能への影響を定量化するアプローチ

安全性能への影響を定量化するアプローチとしては、図3.2-2に示すように、

- ① セメントの近傍にあって顕著に変質するものと予想される範囲の母岩の天然バリア性能を無視し、それよりも下流側の「健全な」領域の天然バリア性能のみに着目する
- ② 母岩の全体について、それぞれの位置・時間で予想される変質の種類や程度に応じた天然バリア性能を想定して評価を行う

という2つのアプローチが考えられる。これらのアプローチのいずれを探るべきかは、変質する母岩領域の大きさや変質後の天然バリア性能の劣化程度やその予測に含まれる不確実性の大きさに依存することとなる。即ち、前項において述べた手法による評価の結果、変質する母岩領域が天然バリア全体に比して十分に小さく、かつ、変質部の天然バリア性能の劣化が著しいまたはそれを判断するための知見が不足しており大きな不確実性が含まれる場合には、上記の①のアプローチを探ることが合理的となる。一方、変質する母岩領域が天然バリア全体と比較しても有意な大きさにまで拡がり、かつ、変質部の天然バリア性能の劣化が顕著ではなく、さらにそれを判断するための知見が十分得られており予測の不確実性が小さい場合には、上記の②のアプローチを探ることが合理的となる。

## 安全性能への影響についての評価手法

### —2つのアプローチ—

#### 健全な天然バリア性能に着目

セメントの近傍にあって顕著に変質するものと予想される範囲の母岩の天然バリア性能を無視し、それよりも下流側の「健全な」領域の天然バリア性能のみに着目する

→ 変質する母岩領域が天然バリア全体に比して十分に小さく、かつ、変質部の天然バリア性能の劣化が著しいまたはそれを判断するための知見が不足しており大きな不確実性が含まれる場合

#### 母岩全体の天然バリア性能

母岩の全体について、それぞれの位置・時間で予想される変質の種類や程度に応じた天然バリア性能を想定して評価を行う

→ 変質する母岩領域が天然バリア全体と比較しても有意な大きさにまで拡がり、かつ、変質部の天然バリア性能の劣化が顕著ではなく、さらにそれを判断するための知見が十分得られており予測の不確実性が小さい場合

図 3.2-2 安全性能への影響を定量化する 2 つのアプローチ

## (b) 変質する母岩領域の大きさを規定する要因

変質する母岩領域の大きさを規定する要因としては、以下のものが考えられる。

① 水酸基の総量（アルカリソースとなるセメントの量およびアルカリ金属やカルシウムの含有率によって規定される）と岩石の構成鉱物による pH 緩衝容量とのバランス

セメントの溶解によって地下水に供給される水酸基の量が、単位体積の岩石に含まれる構成鉱物の溶解による pH の緩衝容量より大きければ大きいほど、岩石の変質が生じる潜在的な影響範囲は広がる。しかしながら、これは、セメント中の水酸基が全て岩石中に侵入し、かつ、そこで全てが構成鉱物の溶解によって消費されるという想定に基づく影響範囲の最大値であり、実際にそれだけの範囲に影響が広がるか否かは次に述べる反応速度と物質移動速度のバランスに依存したものとなる。また、既に述べたように、岩石の構成鉱物の溶解による pH の緩衝容量は、溶解反応に引き続いてどのような二次鉱物が生成するかによっても異なり、特に沈殿に際して水酸基を放出する傾向のあるゼオライト等が二次鉱物に含まれる場合には、ケイ酸塩鉱物の pH 緩衝容量は必ずしも大きなものではない<sup>20)</sup>。

② 物質移動速度と化学的変質速度とのバランス

セメントから溶出した水酸基等が一定以上の濃度で母岩中に滞留する時間は物質移動速度によって異なり、物質移動速度（特に地下水による移流速度）が大きい場合には、分散や希釈によって濃度が低下するまでに岩石の溶解反応に寄与することのできる時間は限られることとなる。他方、岩石の化学的変質速度によって、単位時間内にどの程度の量の構成鉱物が溶解し水酸基が消費されるかが異なることとなる。例えば、物質移動速度が遅く、かつ、鉱物の溶解速度が大きい場合には、岩石の化学的変質はセメントの近傍に集中して生じ、それが時間の進展に伴い、セメントの量と岩石の pH 緩衝容量に応じて徐々に拡大するものと予想される。この場合には、セメント近傍の変質の進んだ部分では岩石中にあって高 pH 条件で不安定となる鉱物はほぼ完全に消失するものと考えられる。逆に、物質移動速度が大きく溶解速度が小さいような場合には、セメント直近にある岩石中の不安定な鉱物が速度論的な制約のために残留している状況において未反応の水酸基等のセメントから溶出するイオンが広い範囲にひろがり、より広範な領域で岩石の変質が生じることとなる。この場合には、変質部は拡がる一方、上流側の変質が進んでいる部分でも未だ本来の岩石の構成鉱物が残留しているという状況が生じる。

③ セメントと岩石の境界部における空隙閉塞の有無

岩石中に流入する水酸基等の溶質の量はセメントの量や特徴のみでは規定されない。既に述べたように、セメントと岩石の境界部ではそれぞれの材料の変質が最も顕著に進展し、初期の構成鉱物が溶失するとともに、二次鉱物の沈殿が生じることとなる。そして、多くの実験結果で観察されているように（付録 1 の 4. 参照）、二次鉱物の沈殿による空隙閉塞の効果が卓越することによって、境界部の物質移動は制限されることが予想される。このような状況では、熱力学的には両立しないはずの未変質のセメント材料と岩石中の未変質のケイ酸塩鉱物とが境界部の変質層の物質移動抵抗のために薄い境界層を隔てて隣接する状況が継続することとなる。また、岩石構成

鉱物の溶解による体積減少と二次鉱物沈殿による体積増加という2つの競合する効果のいずれが卓越するかは、後出の fingering に関しても重要である。岩石構成鉱物の溶解が卓越する場合には、fingering を生じつつ選択的な変質が進展するという自己励起的なプロセスが生じるのに対して、二次鉱物沈殿による体積増加が卓越する場合には、むしろ初期には透水性の高かった部位ほど変質が先行するために空隙閉塞がより進展し、透水性が低下して変質が遅延されるという自己抑制的なプロセスとなる。

#### (c) fingering (粘性指状体) の形成

量比に基づく変質範囲の推定に関するもう1つの問題点として、fingering (粘性指状体) の形成がある。これは、化学反応によって生じる媒体の変質が透水係数を増大させる場合に一般的に見られる現象であり<sup>21)</sup>、岩石中に多かれ少なかれ存在する不均質性のために、ある部位における透水性が周囲よりもほんのわずかでも大きい場合には、そこに周囲よりもほんのわずかに多くの反応性の溶質が流入し、化学反応を生じた結果、初期よりもさらに少しだけその部分の透水性が高まる。そのため、今度は先刻よりももっと集中して反応性の溶質が流入してその結果透水性はさらに高まる、という正のフィードバックループが形成されることとなり、この部分の変質は隣り合った部位とは異なり指数関数的に進展する。このような選択的な変質は一定の間隔を置いて指状に成長していく形態が一般的であるために、このような効果は fingering あるいは粘性指状体の形成と呼ばれる。そして、このような現象が生じた場合には、母岩の変質は局在することとなるため、比較的少ない量のセメントであっても、岩石中を遠くまで貫くような変質が生じて天然バリアとして期待できる距離を減ずる可能性がある。

#### (d) 変質後の母岩の天然バリア性能の推定

変質後の母岩の天然バリア性能の推定方法としては、

- ・ 想定される変質を生じさせた岩石試料を用いて透水試験や拡散試験あるいは核種収着試験を実施する
- ・ 類似した地質環境において既に長期間を経て変質した岩石試料を用いて透水試験や拡散試験あるいは核種収着試験を実施する
- ・ 初期の構成鉱物の溶解および想定される二次鉱物の沈殿を仮定して内部空隙や亀裂の形状変化をモデル化し、さらに、このような変化を考慮した微細な空隙や亀裂形状モデルにおいてナビエ・ストークスの方程式を数値的に解析することによって透水係数や実効拡散係数を推定する

といった方法が考えられる。しかしながら、これらのいずれの場合においても、長期を経た将来に生成する二次鉱物の形態や特徴についての想定が前提条件となるため、前出の二次鉱物の生成系列や Ostwald 系列等に基づく推定に含まれる不確実性が安全評価の信頼性を制限する要因になるものと考えられる。

### (3) まとめ

低アルカリ性セメントの周辺地質環境への影響を評価するための手法としては、

- ・セメント溶解、岩石溶解および二次鉱物生成についての化学反応系
- ・岩石溶解および二次鉱物沈殿についての反応速度モデル
- ・物質移動モデル
- ・岩石やセメントそして特にこれらの境界部の化学的変質に伴う実効拡散係数や透水係数の変化についてのモデル

についての知見を実験やナチュラルアナログ事例等に基づき取得し、これらを多成分反応移動解析モデルとして統合することによって、どのような変質がどの程度の時間および空間的なスケールで生じるかを把握することが主要なものになると考えられる。この結果、顕著な影響の生じる範囲が天然バリア全体の大きさに比べて十分に小さいものであることを示すことが、変質後の岩石の天然バリア性能という現状で最もデータや情報の不足している領域の知識に依存することなく安全評価を成立させる上で好ましい状況であると考えられる。ただし、多成分反応移動解析の前提となる現状の知識には顕著な不確実性が含まれており、この状況において評価の信頼性向上させるためには、

- ・セメント中の水酸基の総量および想定される pH 条件や二次鉱物の種類に基づき予想される各構成鉱物の pH 緩衝容量から変質範囲の上限が与えられること
- ・セメントと岩石の境界部での変質において、構成鉱物の溶解に対して二次鉱物沈殿が卓越することによって、空隙の閉塞が生じ、その後のセメントからの水酸基等の岩石への流入が抑制されること

等の基本的な事項についての検討を行うことによって変質の定性的な特性を把握することが重要と考えられる。

### 3.2.2 本原位置試験の地質環境を対象としたモデル化手法などの適用性と課題

モデル化手法などの適用性と課題の検討の項目と本原位置試験の役割を図 3.2-3 に示す。

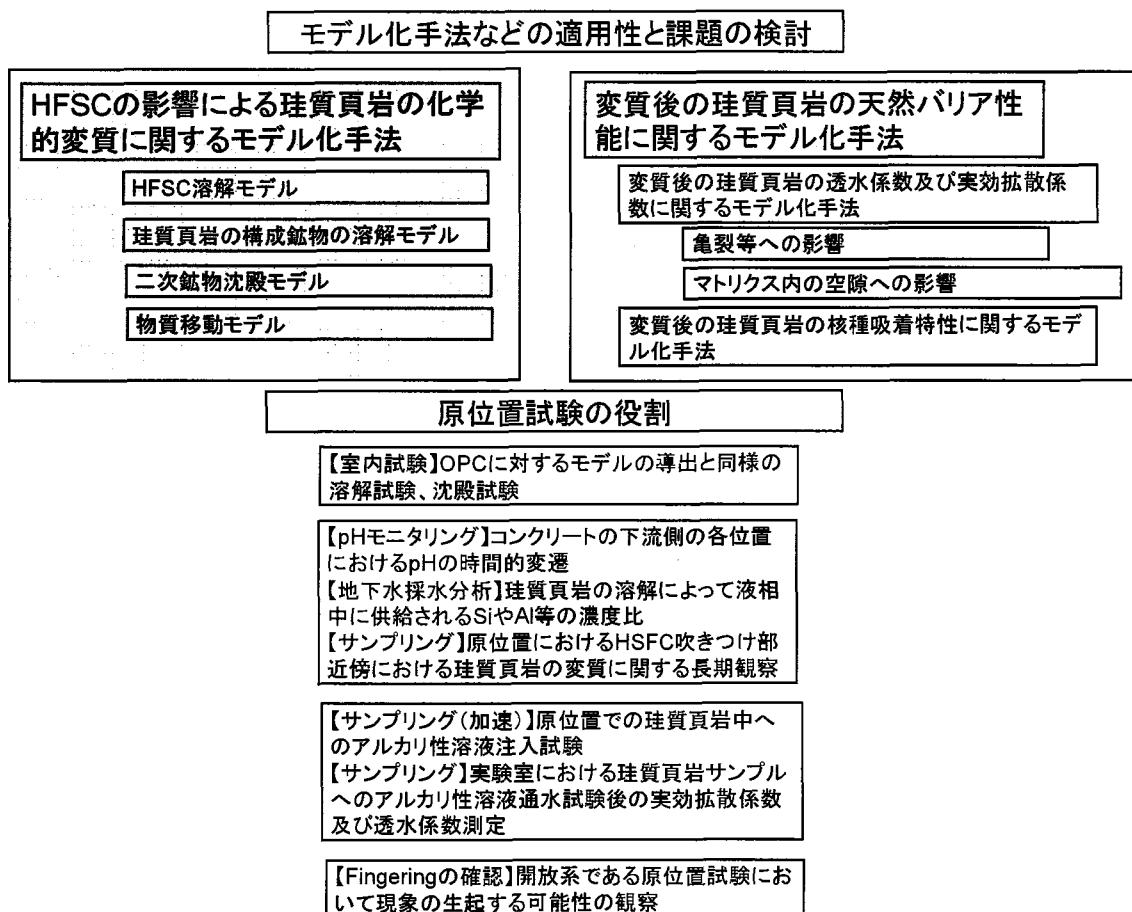


図 3.2-3 モデル化手法などの適用性と課題の検討の項目と本原位置試験の役割

## (1) HFSC の影響による珪質頁岩の化学的変質に関するモデル化手法の適用性と課題

## (i) HFSC 溶解モデル

HFSCの溶解に関しては、前述したUedaら<sup>18)</sup>における杉山モデルに基づく固溶体モデル（付録1の1.）が適用可能と考えられる。ただし、本モデルの妥当性を検証するための実験データは今のところOwada<sup>14)</sup>らに限られているため、今後はこれを拡充していくことが信頼性向上のために必要と考えられる。なお、本来のOPCに対する杉山モデルの導出過程においては、所定のCa/Si比のCSHゲルの溶解試験に加えて、エトリンガイト等のセメント中に共存する鉱物を伴う系での溶解試験や沈殿試験等によって多角的な検証が行われており、HFSCに対する適用性をより確かなものとしていくためには、同様の試験的検討が必要と考えられる。

## (ii) 珪質頁岩の構成鉱物の溶解モデル

珪質頁岩の主要な特徴は、珪藻に起因するシリカの含有率が極めて高いことであり、また、シリカを含む主要な鉱物がオパールとなることである。そこで、珪質頁岩の構成鉱物の溶解モデルとして、オパールの溶解に関するモデル化が必要となるが、既往の研究に基づきモデル化を行うことの可能な部分は平衡論的なモデルであり、特に高pH条件でのオパールの溶解速度に関しては試験的研究あるいはモデル化のいずれも今回の文献調査では見当たらなかった。そこで、今後

は、供給液の液組成（特に pH および Si 濃度）を調整可能なフロースルー試験を行うことによつて、

- pH
- 平衡からのずれの程度

が種々に異なる条件においてオパールの溶解速度データを取得することが必要と考えられる。また、この結果に基づき速度論モデルを構築することとなるが、そのモデルオプションとしては、付録 1 の 2.に示した

- 遷移状態理論 (TST) に基づくもの
- 非線形の経験モデル

に加えて、

- Activated Precursor Complex (PAC) を考慮したモデル

を考慮することが必要と考えられる。また、いずれのモデルを選択する場合においても、その妥当性を示すためには、オパールの溶解反応を素過程にまで分解してメカニズムを明確にすることが必要となり、このためには、量子化学シミュレーションのような手法を補足的に用いることが有効となる可能性がある。

### (iii) 二次鉱物沈殿モデル

HFSC の影響による珪質頁岩の溶解に伴う二次鉱物の沈殿に関しては、既に述べたように、まず、二次鉱物の種類とその時間・空間的系列を推定し、次に、それぞれの二次鉱物の沈殿反応とそれに付随する熱力学データを確定（平衡論モデル）した上で、可能であれば Ostwald 系列における準安定な鉱物と安定な鉱物の間の競合や鉱物粒系の成長に伴う熟成といったプロセスを含めた速度論的な沈殿モデルを構築することが望ましい。

#### ① 二次鉱物の種類とその時間・空間的系列の推定

付録 1 の 3.に示したように、HFSC の影響による珪質頁岩の溶解に伴い生成する二次鉱物の種類を特定するためには、

- コンクリートの下流側の各位置における pH の時間的変遷
- 硅質頁岩の溶解によって液相中に供給される Si や Al 等の濃度比

を把握した上で二次鉱物沈殿の環境の変遷に関するシナリオを明確にし、それぞれの沈殿環境に類似した天然のシステムの事例をナチュラルアナログとして調査することによって、性能評価で想定する時間スケールにおいて想定すべき二次鉱物を抽出するという手順で検討を行うことが適切と考えられる。シリカ含有率の極めて高い珪質頁岩の場合には、溶解後の液相中における Si 濃度も他の元素に比べて高い可能性がある。そこで、シリカに富む主要な鉱物であるオパールの溶解速度とあわせて、現実的な液組成を推定することが重要と考えられる。

また、このような検討を行う上では、珪質頁岩中の pH や Si や Al 等の濃度比の変遷を把握するために、前項で述べた珪質頁岩の溶解に関するモデルを用いた解析的検討が重要と考えられるが、これを補足するものとして、

- 実験室スケールで珪質頁岩サンプルと HFSC を長期間接触させた変質試験

- 原位置における HSFC 吹きつけ部近傍における珪質頁岩の変質に関する長期観察が行われることが望ましい。ここで、注意すべき点は、これらの短期的な試験で生成する二次鉱物がそのまま長期的な時間スケールで代表性を有するものではないということであり、このため、試験においては、生成した二次鉱物の情報に加えて、あるいはそれ以上に二次鉱物の生成する環境条件として重要な pH や Si および Al 等の濃度比を把握することが重要となる。また、この目的のためには、特に原位置試験においては、坑道開放時の大気中の二酸化炭素分圧と坑道閉鎖後のそれとが異なり、また、この相違によって特に方解石等が二次鉱物として支配的となるか（二酸化炭素分圧の高い場合）あるいは CSH 系の鉱物が支配的となるか（二酸化炭素分圧の低い場合）が分岐することに着目し、適切な試験条件を設定し、かつ、長期間にわたってそれを保持することが必要となる。

ナチュラルアナログ事例としては、アルカリ塩湖における種々のケイ酸塩鉱物の溶解によって生じた二次鉱物が参考になるものと考えられる。特に、米国の Searles lake においては、過去 300 万年程度において pH10 程度の環境での変遷が観察されており、これらの成果を HFSC による珪質頁岩の変質という観点から見直すことが重要となる。なお、これらのナチュラルアナログにおける pH 条件は 10~11 程度以下であることから、OPC よりもむしろ HFSC 等の低アルカリ性セメントについての類似性が高い可能性もあると考えられる。

## ② 二次鉱物沈殿の平衡論モデルの作成

二次鉱物の種類が特定されれば、通常の熱力学的データベースに基づきその反応をモデル化し、さらに Raiden 等の解析コードにおいて対応する熱力学的数据を入力することで解析を行うことが可能となる。ただし、このような平衡論的モデルにおいては、通常、Ostwald 系列のように、最初は準安定な鉱物が生成してその後徐々により安定な鉱物に変遷していくという速度論的な熟成の効果が表現できないことが限界となり、後述する速度論モデルによる補完が必要になるものと考えられる。また、一部の二次鉱物については信頼できる熱力学データが不足しており、類似した鉱物で代替される場合もある（illite の代替としての muscovite など）が、信頼性の高い評価を行うためには、これらの鉱物についての熱力学的データの取得も必要に応じて実施していくことが求められるものと考えられる。

## ③ 二次鉱物沈殿の速度論モデルの作成

二次鉱物沈殿についての反応速度モデルは、既に述べたように、平衡論では表現できない「Ostwald 系列のような最初は準安定な鉱物が生成してその後徐々により安定な鉱物に変遷していくという速度論的な熟成の効果」を適切に定量化する上で重要なものである。このための具体的なアプローチとしては、二次鉱物形成における

- 核形成
- 準安定な鉱物と安定な鉱物の間の競合
- 鉱物粒子の成長に伴う比表面積の変化

といった主要なプロセスを明示的に取り入れたモデルが提案されている。HFSC の影響による珪質頁岩の変質の場合にも、この結果を踏まえ、速度論的なモデルの構築を行うことが適切である。

また、このモデル開発を支援するための試験研究としては、想定される二次鉱物の沈殿を高温で加速した試験が重要と考えられる。また、前出のモデルへの情報提供のために、時間の経過に伴う鉱物粒子の粒径分布の時間変化を測定することが必要である。

#### (iv) 物質移動モデル

物質移動モデルは Raiden における既存の分散移流方程式が適用可能である。ただし、通常は地圧によって閉じている稚内層中の亀裂を明示的にモデル化し、構成鉱物の溶解によって亀裂が開口する可能性を検討する場合には、Raiden の二次元解析機能を用いて、亀裂とマトリクス部をそれぞれ考慮した二重空隙モデルを構築することが必要と考えられる。このようなモデル化は変質時のコンクリート中のひび割れの解析などにおいて試みられており適用性はあるが計算時間が顕著に増大する傾向にある点に注意を要する。

岩石の変質に伴う物質移動特性の変化については、ベントナイトの場合（付録 1 の 4.）と同様に試験的に経験則を見出すことが必要と考えられるが、このためには、

- ・ 実験室における珪質頁岩サンプルへのアルカリ性溶液通水試験後の実効拡散係数および透水係数測定
- ・ 原位置での珪質頁岩中へのアルカリ性溶液注入試験

が必要と考えられる。ここで、前者については、変質後の実効拡散係数および透水係数の測定による定量的なデータ取得が主な目的となるが、後者については、fingering の可能性に着目し、構成鉱物の溶解が自己励起的に進むことによる選択的な変質の進展が生じ得るか否かといった定性的な現象の特徴にも着目することが重要と考えられる。なぜなら、fingering の有無は、岩石の変質挙動や変質後の特性のみではなく、系全体のスケールや境界条件にも依存するものであり、系が大きいほど fingering のような「ゆらぎ」の成長する可能性が増すこととなる。このため、カラム試験のような小口径の試験よりもむしろ開放系である原位置試験においてこのような現象の生起する可能性を観察することが適切と考えられるためである。

### (2) 変質後の珪質頁岩の天然バリア性能に関するモデル化手法の適用性と課題

変質後の母岩の天然バリア性能の推定については、既に 3.2.1(2)(ii)(d)で述べたとおりである。

#### (i) 変質後の珪質頁岩の透水係数および実効拡散係数に関するモデル化手法の適用性と課題

変質後の岩石の透水係数および実効拡散係数については、3.2.1(2)(ii)(d)で述べた一般的な課題に加えて、既に 3.2.1(1)(ii)(a)で述べた①、②について留意する必要がある。

- ① 亀裂等への影響
- ② マトリクス内の空隙への影響

#### (ii) 変質後の珪質頁岩の核種吸着特性に関するモデル化手法の適用性と課題

岩石中での核種吸着は、岩石中において一様に生じるわけではなく、鉱物の結晶粒界や鉱物表面に偏在するものと考えられている。このため、変質後の岩石の核種吸着特性は、バルクの組成

としての変化ではなく、むしろ、これらの局部的な位置での化学組成の変化やあるいは新たな被膜の形成に着目してモデル化する必要があると考えられる。モデル化にあたっては、変質後の岩石試料を用いた核種吸着試験が主になると考えられるが、分配係数モデルや Freundlich や Langmuir のような非線形吸着等温線に加えて、イオン交換モデルや表面錯体モデル等の理論的根拠の明確なモデルを補足的に用いることが信頼性の向上のために必要と考えられる。また、本来は単一の鉱物種について適用される表面錯体モデルを鉱物や被膜の集合体である岩石全体に適用するに際しては、いわゆる加成則の成立性（個別の鉱物についての吸着量の和として岩石全体の吸着特性を表現できるか否か）の評価等を含めて実験結果を説明することが必要である。また、このようなモデル化アプローチでは、必要となる入力情報が多大なものとなる可能性が高いことから、既往の研究において推定されている基礎的な定数群は妥当性を確認しつつそのまま用いることや、変質の程度や液相側の条件を前出の岩石の変質解析結果に応じて比較的少数のものに類型化してそれについての試験により代表的なデータのみを取得するといった計画を明らかにすることが必要と考えられる。

### 3.3 ベースコンクリートの配合選定試験

#### 3.3.1 目的

##### (1) 試験目的

本試験は、地下施設の水平坑道の支保工である吹付けコンクリートに、低アルカリ性セメント (HFSC424) の適用性を研究するために、平成 17 年度から開始した。平成 16 年度に行われた地下施設の実施設計において、吹付けコンクリートは厚さ 20cm で設計基準強度 36N/mm<sup>2</sup>が必要とされた<sup>8)</sup>。そこで、平成 17 年度の検討では HFSC の高強度化を計るため、模擬坑道へのコンクリートの吹付け試験を実施して、HFSC424 を用いた W/B=40% の吹付けコンクリート配合を選定した<sup>2)</sup>。

平成 18 年度は、平成 20 年度以降に地下施設の水平坑道の一部に試験施工をするため、地下施設建設に使用されている材料（現地材料）を使用したベースコンクリートの配合を検討する。なお、急結剤を添加した吹付けコンクリートから採取したコアの圧縮強度は、急結剤の添加前のベースコンクリートの供試体の圧縮強度より大きいことが確認されている<sup>2)</sup>ので、平成 18 年度は、現地材料を用いた急結剤の添加前のベースコンクリートを用い、吹付けコンクリートとして所定のフレッシュ性状と硬化性状を満足する配合を選定することにした。

##### (2) 実施内容

- ・ 使用材料の物性確認

セメント、骨材、混和材料の各物性を試験成績表により確認する。

- ・ ベースコンクリートの配合選定試験

単位水量、細骨材率、水結合材比を変化させたベースコンクリート（急結剤の添加前）のフレッシュ性状、強度発現性状を確認する。

- ・ 急結剤を添加したモルタルの急結性状試験

急結剤を添加した後の急結モルタルの凝結・硬化速度、初期強度等を確認する。

### 3.3.2 使用材料の物性確認

#### (1) 使用材料および結合材の混合割合

本試験は地下施設内で行うため、現地材料を利用するすることを基本とした。表 3.3-1～表 3.3-3 に使用材料を示す。使用材料の物性は、材料購入時にメーカーから提出された試験成績表（付録 2 参照）により、以下の使用材料の品質が JIS 規格等に基づくことを確認した。また、試験で使用した HFSC の混合割合を表 3.3-4 に示す。

- ① セメント : JIS R 5210 のうち密度、比表面積(Blain)、凝結、圧縮強さ、化学成分、全アルカリ量
- ② シリカフューム : JIS A 6207 のうち、二酸化けい素、酸化マグネシウム、三酸化イオウ、遊離酸化カルシウム、遊離けい素、塩化物イオン、強熱減量、湿分、密度、比表面積(BET)、活性度指数（材齢 7 日、28 日）
- ③ フライアッシュ : JIS A 6201 のうち、二酸化けい素、湿分、強熱減量、密度、粉末度(Blain)、45μm ふるい残分、フロー値比、活性度指数（材齢 28 日、91 日）
- ④ 細骨材 : JIS A 1102 (ふるい分け)、JIS A 1103 (微粒分量)、JIS A 1104 (単位容積質量および実積率)、JIS A 1109 (密度および吸水率)、JIS A 1111 (表面水率)
- ⑤ 粗骨材 : JIS A 1102 (ふるい分け)、JIS A 1103 (微粒分量)、JIS A 1104 (単位容積質量および実積率)、JIS A 1110 (密度および吸水率)
- ⑥ 高性能 AE 減水剤 : JIS A 6204 のうち、減水率、ブリーディング量の比、凝結時間の差分、経時変化量、圧縮強度比

表 3.3-1 セメント材料

種類	メーカー	仕様
普通ポルトランドセメント (OPC)	日鐵セメント社製 (現地使用材料)	密度=3.16g/cm <sup>3</sup>
早強ポルトランドセメント (HPC)	"	密度=3.14 g/cm <sup>3</sup>
シリカフューム (SF)	エルケム社製	940-U 密度=2.2g/cm <sup>3</sup>
フライアッシュ (FA)	北電興業社製 (現地使用材料)	北海道電力苦東厚真火力(発)産 JIS II 種相当 密度=2.20 g/cm <sup>3</sup>

表 3.3-2 骨材

種類	メーカー	仕様
細骨材(S)	幌延砂利興業社製 (現地使用材料)	幌延町浜里産 F.M.=2.78 密度=2.66g/cm <sup>3</sup>
粗骨材(G)	"	幌延町浜里産 1505 玉砂利 密度=2.68g/cm <sup>3</sup>

表 3.3-3 混和材料

種類	メーカー	仕様
高性能 AE 減水剤	エムエムビー社製 (現地使用材料)	レオビルト SP8SV ポリカルボン酸系
急結剤	電気化学工業社製 (現地使用材料)	ナトミック TYPE-10 高強度吹付け用, 粉末, 標準添加率=HFSC×10%
PP 繊維(Fiber)	萩原工業社製 (現地使用材料)	バルチップ M·K 密度=0.91g/cm <sup>3</sup>

表 3.3-4 結合材の混合割合

記号	ポルトランドセメントの種類	混合割合 (%)		
		ポルトランドセメント	シリカフューム	フライアッシュ
HFSC424N	OPC	40	20	40
HFSC424H	HPC	40	20	40

### 3.3.3 試験方法

配合選定の手順を以下に示す。

#### (1) 単位水量の選定

平成 17 年度に実施したHFSCの吹付けコンクリート用のベースコンクリートの配合選定試験<sup>2)</sup>では、平成 14 年度の検討<sup>4)</sup>を参考に単位水量 200kg/m<sup>3</sup>をベースに検討した。一方、幌延深地層研究計画において、水平坑道に適用する吹付けコンクリートの基本配合では、単位水量を 175kg/m<sup>3</sup>として検討されている。この理由は、HFSCと普通のセメントとの違いにもよるが、粗骨材が、HFSCでは碎石を使用しているのに対し、地下施設工事では玉砂利を使用しているためと考えらる。そこで、今回検討する単位水量は地下施設建設と同じく 175kg/m<sup>3</sup>をベースに設定した。

つまり、水結合材比は、平成 17 年度の検討からHFSC424Nで強度上必要とされた 40%を基本とし、単位水量を 175±10kg/m<sup>3</sup>とした場合のコンクリートのフレッシュ性状を比較することとした。なお、細骨材率 (s/a) はこれまでの実績値 (60%) とした。また、目標スランプ値は、これまでの一般的なトンネル施工の実積から吹付け場所で 18cm以上とし、荷卸し地点ではスランプ低下を考慮して 21cmとなるように、高性能AE減水剤をセメント量の 1%程度 (メーカー推奨値) で調整した。高性能AE減水剤を使用するレディミクストコンクリートのJIS規定にならい、スランプの許容誤差は±2cmとした。

#### (2) 細骨材率の選定

セメントは HFSC424N、水結合材比は 35, 40%とし、細骨材率を 60±5%に変化させて、コンクリートのフレッシュ性状を比較し、吹付けコンクリートのベース配合に適した細骨材率を選定する。

### (3) その他の要因に対する性状把握

単位水量、細骨材率以外にW/Bを変化させた場合、HFSC424Nにファイバーを混入した場合およびセメントをHPCとした場合(HFSC424H)についてベースコンクリートの混練り試験を実施し、フレッシュ性状および硬化性状を把握する。一般的OPCを使用した吹付けコンクリートでは、水セメント比を小さくすると粘性が増し、ポンプ圧送性が低下することによって施工能率が低下すると言われている<sup>7)</sup>。通常のOPCの施工では水セメント比40%以上で行われているため、本検討では、HFSCの水結合材比の範囲を35%~45%とした。

#### 3.3.4 試験項目

##### (1) フレッシュ性状

HFSC424NのW/B=35%, 40%およびHFSC424HのW/B=40%, 45%の4配合は、練上り後90分まで30分毎に練返し、フレッシュ性状を測定し経時変化を把握する。試験項目および方法を表3.3-5に示す。

表3.3-5 フレッシュコンクリートに関する試験項目と試験方法

試験項目	試験方法	管理値
スランプ試験	JIS A 1101に準拠(経時変化の確認を含む)	18cm±2cm
空気量試験	JIS A 1128に準拠	—
O漏斗流下時間	JSCE F 512(案)に準拠	—
コンクリート温度の測定	温度計にて測定	—

##### (2) 硬化性状

###### (i) 圧縮強度試験

フレッシュ性状試験終了後に、Φ10×20cmの供試体を採取し、材齢1日まで型枠内で湿布養生する。脱型後、20±3°Cの水中に標準養生し、材齢1日、7日、28日、56日、91日に圧縮強度試験を実施する。コンクリートの圧縮強度試験方法は、JIS A 1108に準拠する。

#### 3.3.5 試験ケース

ベースコンクリートの配合選定試験における試験ケースを表3.3-6に、配合を表3.3-7に示す。

表3.3-6 ベースコンクリートの配合選定試験における試験ケース

単位水量 W	水結合 材比 W/B	HFSC424N			HFSC424N ファイバー混入	HFSC424H	
		細骨材率 s/a					
		55%	60%	65%	60%		
165kg/m <sup>3</sup>	40%		②				
175kg/m <sup>3</sup>	35%	⑧	⑥	⑦	⑩	⑭	
	40%	⑤	③	④	⑨	⑪	
	45%		⑬			⑫	
	40%		①				

注) 表内の○内の数字は、試験順序を示す。

### 3.3.6 試験結果

#### (1) フレッシュ性状

試験に用いたコンクリートの配合を、表 3.3-7 に示す。表中の配合 No. は表 3.3-6 の試験順序に対応している。

表 3.3-7 吹付け用ベースコンクリートの配合

配合 No.	セメント 種類	水結 合材 比 W/B (%)	細骨 材率 s/a (%)	配合								
				単位量(kg/m <sup>3</sup> )					細骨 材 S	粗骨 材 G	(V×%)	(B×%)
				水 W	HFSC							
8	HFSC424N	35	55	175	500	200	100	200	857	706	-	1.05
6		35	60	175	500	200	100	200	935	628	-	1.05
7		35	65	175	500	200	100	200	1013	549	-	1.05
5		40	55	175	438	175	88	175	893	736	-	0.90
2		40	60	165	413	65	83	65	1006	676	-	1.00
3		40	60	175	438	175	88	175	975	655	-	0.90
1		40	60	185	463	185	93	185	943	633	-	0.80
4		40	65	175	438	175	88	175	1056	573	-	0.90
13		45	60	175	389	158	76	158	1006	675	-	1.00
10	HFSC424H Fiber 入り	35	60	175	500	200	100	200	935	628	1.00	1.10
9		40	60	175	438	175	88	175	975	655	1.00	1.00
14	HFSC424H	35	60	175	500	200	100	200	934	627	-	1.05
11		40	60	175	438	175	88	175	974	654	-	0.90
12		45	60	175	389	158	76	158	1005	675	-	1.00

ベースコンクリートのスランプ値の経時変化を、図 3.3-1 に示す。

この試験結果から、以下のことが明らかになった。

- ① 30 分程度ではスランプの低下は少ないが、60 分を越えると、初期にスランプが 21cm 以下のものは低下が大きくなる。
- ② 高性能 AE 減水剤の添加量が、低下の大きいものは 0.9%であるのに対し、安定しているものは 1%以上添加したものである。
- ③ したがって、練り置き時間を 30 分以上見込む場合には、高性能 AE 減水剤を HFSC 量の 1.0~1.1%を添加し、初期の目標スランプを 21cm 程度に設定するのがよい。
- ④ 空気量は特に規定しないが、3.2%~4.3%の範囲にある。

また、平成 18 年度は吹付け試験を実施しないため、吹付けコンクリートに適したフレッシュ性状を複数の専門家により評価した比較結果を表 3.3-8 に示す。各パラメータの影響は以下の通りである。

#### <単位水量の影響>

- ・単位水量を減らすともったりし、増やすと軽くなる。
- ・専門家の評価により、165~175kg/m<sup>3</sup>を選定した。

#### <s/a の影響>

- ・s/a を小さくするとサクサクし、大きくすると抵抗感が小さくなる。
- ・専門家の評価により、55~60%を選定した。

表 3.3-8 専門家による吹付けコンクリートに適したフレッシュ性状評価

単位 水量 W	水結合材 比	HFSC424N				HFSC424Nファイバー入り		HFSC424H	
		細骨材率: s/a				60%		60%	
		55%		60%		65%		60%	
165 kg/m <sup>3</sup>	40%		②粘り少ない	4.75					
			もつたりし重い、 粘りが大きい	4.00					
			粘性小、 サクサク	4.50					
			粘性がやや小、 スランプ形状良好	3.00					
175 kg/m <sup>3</sup>	35%	⑧適度な粘り、 手離れがよい	4.50	⑥練り上がりは良い、 経時変化あり	4.50	⑦粘り、 重い	4.00	⑩ベースより性状 が良好	4.75
		重い、 もつたりし粘る	3.50	ほど良い粘り	4.50	砂っぽく軽い、 やや粘りが少ない	2.50	ほど良い粘り	4.50
		抵抗感大、 サクサク	3.50	抵抗感中間	4.00	抵抗感小さい (モルタルに近い)	3.00	ファイバーが入って も同じ	4.00
		扱い易い、 やや砂利が目立つ	4.00	スランプ良好	5.00	スランプ形状良好	4.00		
	40%	⑤粘りが少ない	4.75	③経時変化少なく 良好	5.00	④練り上がり良好、 経時変化あり	4.25	⑨ベースより性状 が良好	5.00
		重い、硬い、 粘りが大きい	4.00	ほど良い粘り	5.00	軽い、軟らかい、 粘りが少ない	2.00	ほど良い粘り、 適度な硬さ	5.00
		抵抗感大、 サクサク	4.50	抵抗感中間、 経時変化良好	5.00	抵抗感小さい (モルタルに近い)	4.00	ファイバーが入って も同じ	5.00
		砂利が目立つ	3.00	スランプ形状良好	5.00	s/a 60%より感触良い、 ロード速い	4.00	③と同じ軟らかさ	4.50
	45%		⑪軟らかく、 粘りが少ない	4.50				⑫粘りが強い、 練り置きが良い	4.75
								重い、 粘り少ない	2.50
								経時変化なし、 ②より軟らかい	4.00
185 kg/m <sup>3</sup>	40%		①軽いが粘る	4.50					
			軽い、軟らかい、 粘りが少ない	2.50					
			粘性大	3.00					

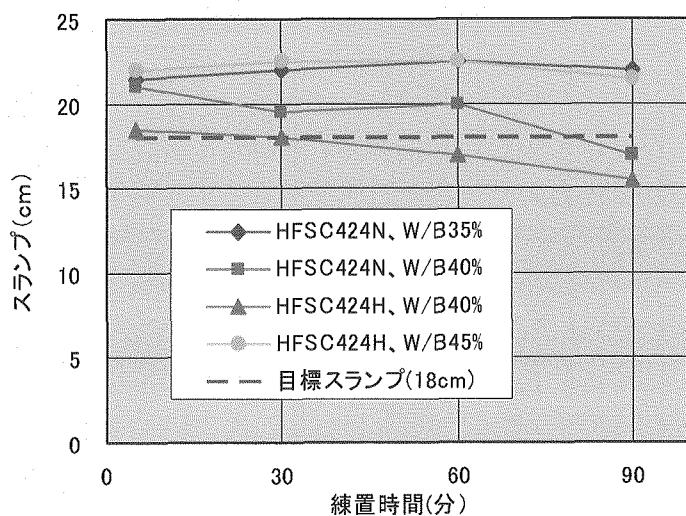


図 3.3-1 ベースコンクリートのスランプ値の経時変化

## &lt;W/B の影響&gt;

- ・W/B を小さくするとやや粘性が増し、大きくすると粘性が少なくなる。
- ・専門家の評価では、W/B を変えてもフレッシュ性状は大差無く、W/B は硬化性状により判定する。

## &lt;ファイバーの影響&gt;

ファイバーを混入してもフレッシュの性状は同等である。

## &lt;早強セメントの影響&gt;

早強にすると抵抗が軽くなる程度で、フレッシュ性状はほとんど変わらない。

## (2) 硬化性状

ベースコンクリートの供試体の圧縮強度試験結果を、表 3.3-9 に示す。ベースコンクリートの水結合材比と材齢 28 日圧縮強度の関係を、図 3.3-2 に示す。この試験結果から、以下のことが明らかになった。

- ① HFSC の圧縮強度は、昨年と同様に水結合材比とおおよそ直線関係にあることが認められる。
- ② 平成 17 年度に試験を実施した HFSC424N(W/B=40%, s/a=60%) と比較して、28 日強度が 12~18% 小さい。

表 3.3-9 吹付け用ベースコンクリートの試験結果

配 合 No	フレッシュ性状						硬化性状				
	試験時期 (分)	スランプ (cm)	スラ ンプ フロ ー (mm)	○漏 斗流 下時 間 (sec)	空気 量 (%)	温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )				
							1 日	7 日	28 日	56 日	91 日
8	5	21.0	415	4.6	3.2	20.7	5.91	25.3	50.6	57.4	68.9
6	5	21.0	405	5.4	3.4	20.8	5.85	25.9	51.4	60.5	67.7
7	5	20.5	385	5.6	4.2	20.8	5.75	25.5	51.6	61.2	68.0
5	5	19.5	400	4.4	3.6	20.7	3.76	19.8	41.7	51.8	58.2
2	5	21.0	415	4.9	4.2	20.7	3.95	19.2	39.1	53.5	60.8
3	5	20.0	405	4.8	3.6	20.6	3.82	18.7	41.1	51.8	58.5
1	5	19.0	370	5.7	3.4	20.5	3.99	20.5	43.1	52.4	61.3
4	5	19.5	400	4.1	4.3	20.8	3.77	19.6	41.6	51.5	60.4
13	5	23.0	455	3.0	3.6	20.4		15.3	33.9		51.9
10	ベースコン Fiber 混入後	21.5 22.0	390 420	4.2	4.0	20.8	5.10	25.2	49.0	59.3	68.4
9	ベースコン Fiber 混入後	21.0 20.5	410 425		3.8	20.6	4.20	20.4	41.3	51.0	56.6
14		20.5	385	6.1	3.7	20.7		30.7	54.3		73.6
11	5	19.0	400	5.3	3.5	20.8	8.34	25.8	45.1	55.0	56.2
12	5	21.5	425	3.6	3.8	20.6	6.31	21.0	39.7	50.7	54.6

平成 17 年度の配合と変わった配合条件は以下の通りである。

- ・セメント：太平洋社製→日鐵社製
- ・骨材：新潟県産砕石→北海道産砂利
- ・単位水量： $200\text{kg}/\text{m}^3 \rightarrow 175\text{kg}/\text{m}^3$
- ・ポルトランドセメント量： $200\text{kg}/\text{m}^3 \rightarrow 175\text{kg}/\text{m}^3$
- ・減水剤：HS700（フローリック社製）→SP8SV（NMB 社製）

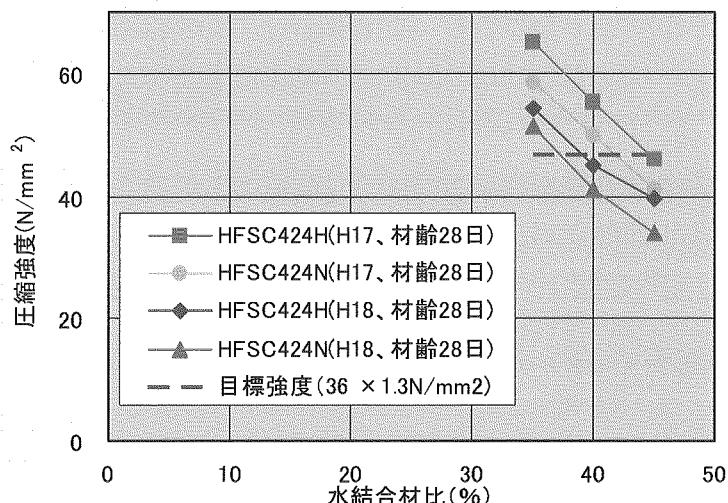


図 3.3-2 ベースコンクリートの圧縮強度の経時変化

次にベースコンクリートの圧縮強度の経時変化について、W/B=35%の場合を、図 3.3-3 に示す。圧縮強度の試験結果から、以下のことが明らかになった。

- ① HFSC424 のセメントを普通ポルトランドセメントから早強に変えると、初期強度は大きくなるが、圧縮強度の増進は若干少なくなるようである。
- ② ベースコンクリートにファイバーを入れると、圧縮強度は、W/B=40%のときには若干大きくなるが、W/B=35%のときには若干小さくなる。

HFSC の強度を増大するには、早強ポルトランドセメントの使用、混合割合の変更（例えば HFSC523）、設計材齢を 91 日で評価する、水結合材比の低減、粗骨材を砕石に変更、および空気量の低減などの方策が考えられるが、ここでは地下施設の水平坑道で用いる高炉セメントベースの吹付けコンクリートが W/B=38.8%で施工されていることから、W/B を 40%から 35%程度に低減した配合を選定した。

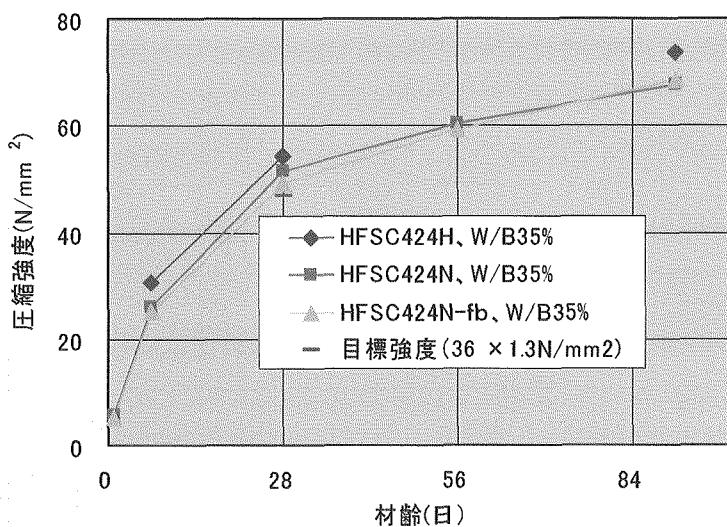


図 3.3-3 ベースコンクリートの圧縮強度の経時変化

### 3.4 急結剤を添加したモルタルの急結性状試験

#### 3.4.1 試験目的

「ベースコンクリートの配合選定試験」で選定した配合から、粗骨材を除いたモルタル配合に急結剤を添加して、凝結性状と圧縮強度発現性状を確認する。試験は、土木学会規準に記載されている「吹付けコンクリート用急結剤品質規格」(JSCE-D 102-1999)に準じて実施する。品質規格は次のとおりである。

- ① 急結剤を混入したモルタルは、貫入抵抗試験により得られる貫入抵抗値が、 $3.5\text{N/mm}^2$ に達する始発時間が 5 分以内、 $28\text{N/mm}^2$ に達する終結時間が 15 分以内でなければならない。
- ② 急結剤を混入したモルタルは、圧縮強度試験により得られる 12 時間圧縮強度が $1\text{N/mm}^2$ 以上、24 時間圧縮強度が $9\text{N/mm}^2$ 以上でなければならない。

#### 3.4.2 試験項目

##### (1) 貫入抵抗

試験は温度  $20\pm3^\circ\text{C}$ 、相対湿度 80%以上の室内で行う。貫入抵抗は急結剤添加後、45 秒、1 分、2 分、3 分、5 分、7 分、10 分、15 分に測定する。なお、土木学会基準の 15 分の貫入抵抗値を事前に満足した場合、以降の測定は行わないこととする。モルタルの成型状況を図 3.4-1、貫入抵抗試験状況を図 3.4-2 に示す。

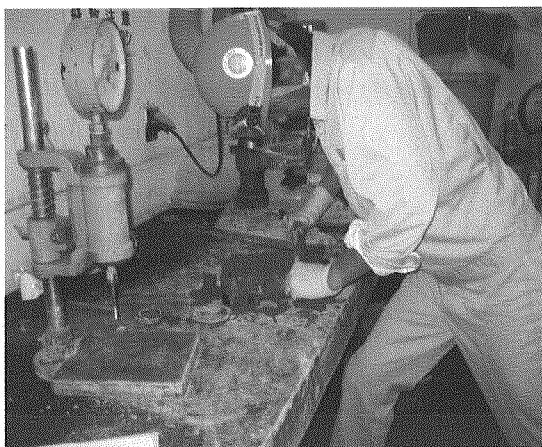


図 3.4-1 モルタルの成型状況

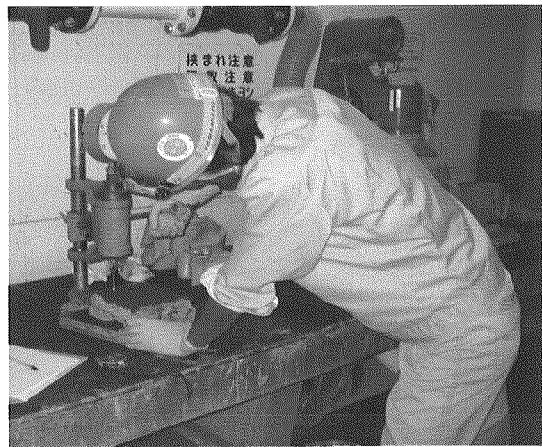


図 3.4-2 貫入抵抗試験状況

## (2) 圧縮強度

試験は JIS R 5201 に準じ、温度  $20\pm3^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 80%以上の室内で行う。供試体は材齢 1 日までは型枠内湿布養生とし、それ以降は温度  $20\pm3^{\circ}\text{C}$  の水中にて標準養生する。試験材齢は、3 時間、6 時間、1 日、7 日、28 日、56 日とする。

### 3.4.3 試験ケース

モルタル試験の要因と水準を、表 3.4-1 に示す。

所定のベースコンクリート配合から、粗骨材を除いたモルタルとし、急結剤はセメント総重量に対して 10%添加する。

表 3.4-1 モルタル試験の要因と水準

		セメントの種類	
		HFSC424N	HFSC424H
W/B	35%	○	
	40%	○	○
	45%		○

### 3.4.4 試験結果

#### (1) 貫入抵抗

貫入抵抗試験の結果を、表 3.4-2 に示す。試験は貫入抵抗値が土木学会基準(15 分以内に  $28\text{N/mm}^2$ )をクリアした時点で終了した。

表 3.4-2 プロクター貫入抵抗値

経過時間(分)	0.75	1	2	3	5	7	10	15
HFSC424N,W/B35%	5	10.8	16.1	26.5	30.5			
HFSC424N,W/B40%	3.6	5.7	10.8	22.2	25.1	25.1	30.5	
HFSC424H,W/B40%	4.3	6.8	21.5	29.4				
HFSC424H,W/B45%	3.6	8.6	17.6	24	30.1			
土木学会規準					3.5			28

(単位 : N/mm<sup>2</sup>)

急結剤添加モルタルの凝結特性を図 3.4-3 に示す。

この試験結果から、以下のことが明らかになった。

- ① HFSC424N の W/B=40% の配合において、5 分以降の貫入抵抗値が停滞するなど試験結果にばらつきはあるものの、実施した 4 配合では経過時間 5 分で 3.5N/mm<sup>2</sup>以上、15 分で 28N/mm<sup>2</sup>以上の土木学会規準を全て満足した。
- ② したがって、HFSC424N および HFSC424H に対する急結性状は、現地材料を用いても大きく変わらないものと考えられる。

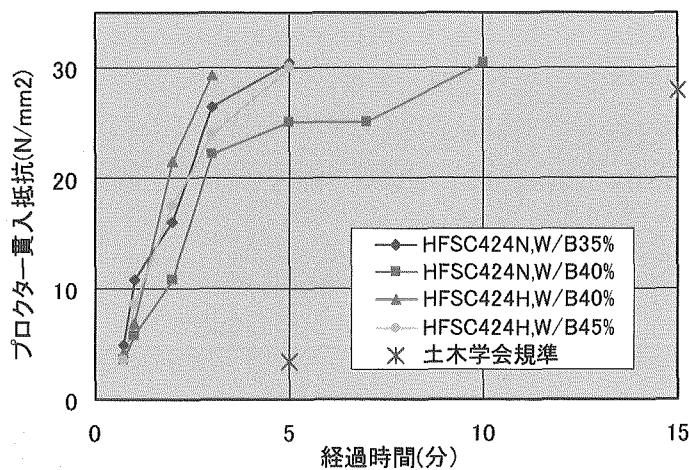


図 3.4-3 急結剤添加モルタルの凝結特性

## (2) 圧縮強度

圧縮強度試験の結果を、表 3.4-3 に示す。

表 3.4-3 圧縮強度試験値

材齢(日)	0.125	0.25	0.5	1	7	28	56
HFSC424N,W/B35%	2.88	4		14.1	30.4	49.1	55.5
HFSC424N,W/B40%	1.5	3.01		10.6	24.8	45.5	49.3
HFSC424H,W/B40%	2.1	2.42		13.9	31.3	46.2	50.7
HFSC424H,W/B45%	1.66	2.53		8.5	20.7	42.5	46.3
土木学会規準				1	9		

(単位 : N/mm<sup>2</sup>)

急結剤添加モルタルの強度特性を図 3.4-4 に示す。

この試験結果から、HFSC424HのW/B=45%の配合において、材齢1日の圧縮強度が土木学会規準の $9\text{N/mm}^2$ に若干満たない $8.5\text{N/mm}^2$ になった以外は、実施した4配合では材齢12時間で $1.0\text{N/mm}^2$ 以上の土木学会規準を全て満足することが明らかとなった。

なお、急結剤添加モルタルの材齢28日の圧縮強度は、目標強度の $36 \times 1.3 = 46.8\text{N/mm}^2$ に若干満たないケースもあるが、この試験の目的が急結性状把握であり、評価材齢は土木学会基準にあるように材齢1日までに限定してよいと考えられる。

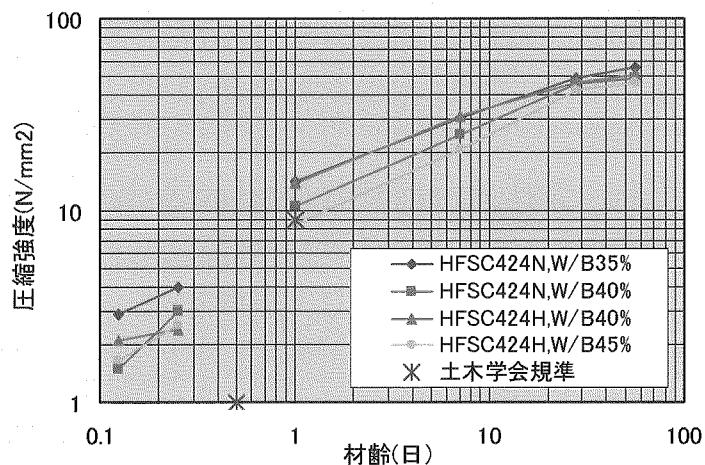


図 3.4-4 急結剤添加モルタルの強度特性

### 3.5 吹付け用コンクリートに適した配合

HFSCのセメントの種類はHFSC424N、単位水量は地下施設の実施設計において示されている $175\text{kg/m}^3$ として、ベースコンクリートの各性状を比較し総合評価を行った結果を表3.5-1に示す。

表3.5-1上段の施工性状とは、専門家による吹付けコンクリートに適したフレッシュ性状評価（満点5点）の平均点とし、4点程度以上を○とした。また、表中段の初期強度とは、急結剤を添加モルタルの材齢1日の圧縮強度値で、土木学会規準値の $9\text{N/mm}^2$ 以上を○とした。さらに、表下段の設計強度とは、ベースコンクリート標準養生供試体の28日強度に対して、設計基準強度に材料や施工の不確実性を考慮した割増し率1.3倍を乗じて設定した目標強度： $36 \times 1.3 = 46.8\text{N/mm}^2$ 以上を○とした。また、特に性状が良好なものは◎とした。以上の検討結果から、吹付けコンクリートに適したベースコンクリートとして、表3.5-2に示す配合を選定した。

なお、本検討では現地材料を用いて、ベースコンクリートの性状により吹付けコンクリート配合を選定したが、粗骨材が玉砂利になったなど使用材料が変わったことから、原位置試験までには、現地のコンクリート製造プラントおよび吹付け機械を利用して、最終的な吹付け模擬試験を実施して吹付けコンクリートの強度をコアにより確認する必要があると考えられる。

表 3.5-1 ベースコンクリートの性状比較

		細骨材率 s/a			目標性能
		55%	60%	65%	
水結合材比 W/B	35%	3.9○	4.5○	3.4△	施工性状
		○	14.1○	○	初期強度
		50.6○	51.4○	51.6○	設計強度
	40%	4.1○	5.0○	3.6△	施工性状
		○	10.6○	○	初期強度
		41.7△	41.1△	41.6△	設計強度
	45%	○	4.5○	△	施工性状
		△	△	△	初期強度
		×	33.9×	×	設計強度

注) 試験を実施していないものの評価は、周りの測定値から推定した。

表 3.5-2 吹付けコンクリートに適したベースコンクリートの配合

セメント種類	W/B (%)	スランプ(cm)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
				W	結合材量(B)			S	G	高性能AE 減水剤
					OPC	SF	FA			
HFSC 424N	35	21±2	60	175	200	100	200	935	628	B×1.05%

## 4. HFSC を用いたコンクリート材料の pH 低下挙動の把握

### 4.1 目的

HFSC の pH 低下挙動を把握することを目的として、平成 14 年度に作製し浸漬・養生を継続している円板状 ( $\phi 5 \times 2\text{cm}$ ) の HFSC ペースト供試体を対象に、平成 17 年度の評価から 1 年後に液相（養生水）および固相試料の評価を行った。

### 4.2 試験方法

#### 4.2.1 試料作製

##### (1) 場所打ち用ペースト

本試験で使用したセメントおよび SF は、既往の研究<sup>4)</sup>と同様にそれぞれ太平洋セメント社製の OPC およびノルウェー産のエルケム社製マイクロシリカ Grade940 とした。FA は、中部電力碧南火力発電所から出る FA を分級して最大粒径を  $20\mu\text{m}$  以下とした、太平洋セメント社製のオノダスープーフロー-20 を用いた。これらの材料は、既往の HFSC の変質評価研究<sup>3)</sup>で使用したものと同じものである。

供試体の水結合材比は 30% とし、骨材を含まないセメントペーストを用いた。また、HFSC の配合は HFSC226, 325, 424, 523 および 424 吹付けの 5 配合とした。試験体作製作業は、すべて大気開放条件で  $20^\circ\text{C}$  に温度制御された室内で行った。

##### (2) 吹付け用ペースト

急結剤の影響を評価し、吹付けコンクリートとしての pH の低下挙動を把握するために、平成 17 年度に HFSC424N の水結合材比 45% を用いて円盤状供試体を作製し、浸漬を開始した<sup>2)</sup>。供試体は、急結剤を使用するため、「急結剤効果の確認試験」の際に供試体を作製し、28 日間養生の後、スライスして浸漬を開始した。

#### 4.2.2 浸漬および保管方法(継続)

セメントペーストを混練後、直径 5cm、高さ 10cm のモールドに詰め、 $20^\circ\text{C}$  で 1 日養生した後脱型し、上下 1cm ずつを切除した残りを 4 つにスライスし、 $\phi 5\text{cm} \times 2\text{cm}$  の円盤状供試体を作製した。その後、ポリエチレン容器に入れ蒸留水を満たし、炭酸ガスを排除した容器内に室温( $20^\circ\text{C}$ )で保管した。浸漬時の炭酸ガス混入を低減するため、容器内に極力空気が入らないように上端部までイオン交換水を満たした。配合毎に 1 つの容器に数個の円盤状供試体を入れた状態で浸漬している。

浸漬および保管の状況を図 4.2-1 および図 4.2-2 に示す。

なお、上記分析用の供試体および液相を採取した後、容器を再び密閉して、浸漬を継続した。

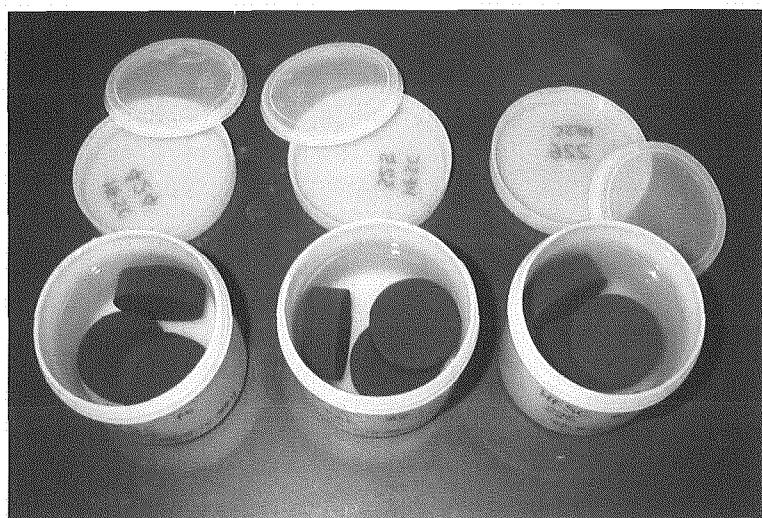


図 4.2-1 供試体の養生状況

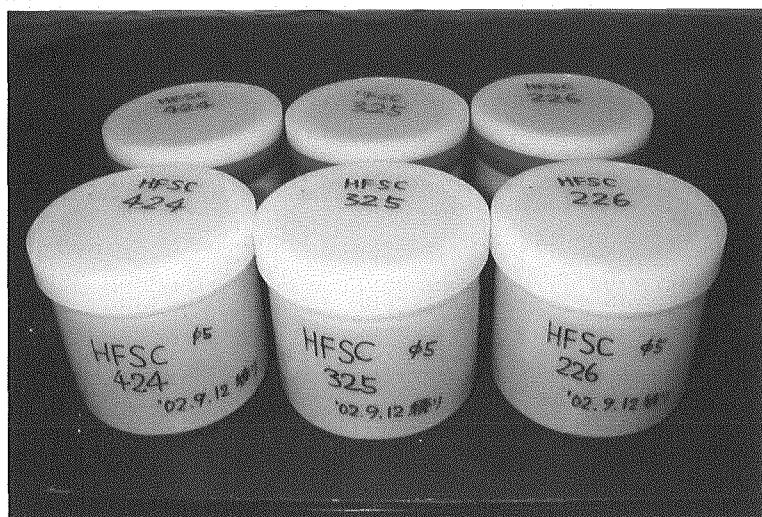


図 4.2-2 供試体の保管状況

#### 4.3 試験項目

混練からの材齢が 1547 日 (221 週=4 年 3 ヶ月) となった時点で、各ケースについて 1 つの供試体を取り出して素早く真空乾燥を行い、固相分析を実施した。また、同時に養生水の一部を採取して液相の分析も行った。

平成 17 年度より HFSC523 と吹付け試料(HFSC424N)の 2 ケースを新たに試験に追加した<sup>2)</sup>。この 2 ケースは練り混ぜから 28 日間養生の後に、高さ 2cm の円板状に調製し、同様の養生・浸漬を行っている。浸漬開始後 364 日 (1 年) 経過時に他の 3 ケースと同様の評価を実施した。

#### 4.3.1 固相の分析方法

##### (1) TG-DTA（示差熱天秤分析）

固相試料を真空乾燥、粉碎した後、TG-DTAにより水和物の同定を行った。また、定量できるものは定量分析を実施した。

##### (2) 化学分析

固相試料を真空乾燥、粉碎した後に化学分析を実施した。分析する元素は Ca, Si, Al, Na, K の 5 成分とし、JCAS I-11 に準拠して分析を実施した。なお、分析成分は酸化物として表した。

##### (3) 元素分布

円板状供試体の直径断面の元素マッピングを EPMA により行った。測定元素は Ca, Si, Na, K とした。

#### 4.3.2 液相の分析方法

##### (1) pH 測定

ガラス電極法により pH を測定した。炭酸化の影響を避けるため、開封後素早く（1～2 分程度）測定を行った。

##### (2) 組成分析

0.45 $\mu\text{m}$ のメンブランフィルターでろ過し、適当な濃度に希釈、酸調整して組成分析を行った。分析を実施する成分は Ca, Si, Al, Na, K, S, Cl の 7 成分とした。Cl は IC（イオンクロマトグラフ）、その他の成分は ICP-AES（誘導結合プラズマ発光分光光度計）により測定した。

#### 4.4 試験ケース

混練からの材齢が HFSC226, 325, 424 は 1547 日となった時点で、HFSC523 と 424 吹付けは材齢 364 日となった時点で、配合ごとに 1 つの供試体を取り出して固相分析を実施した。また、同時に浸漬液の一部を採取して液相の評価も行った。

#### 4.5 試験結果

##### 4.5.1 固相分析

##### (1) TG-DTA

各ケースの TG-DTA 測定チャートを図 4.5-1～図 4.5-5 に示す。

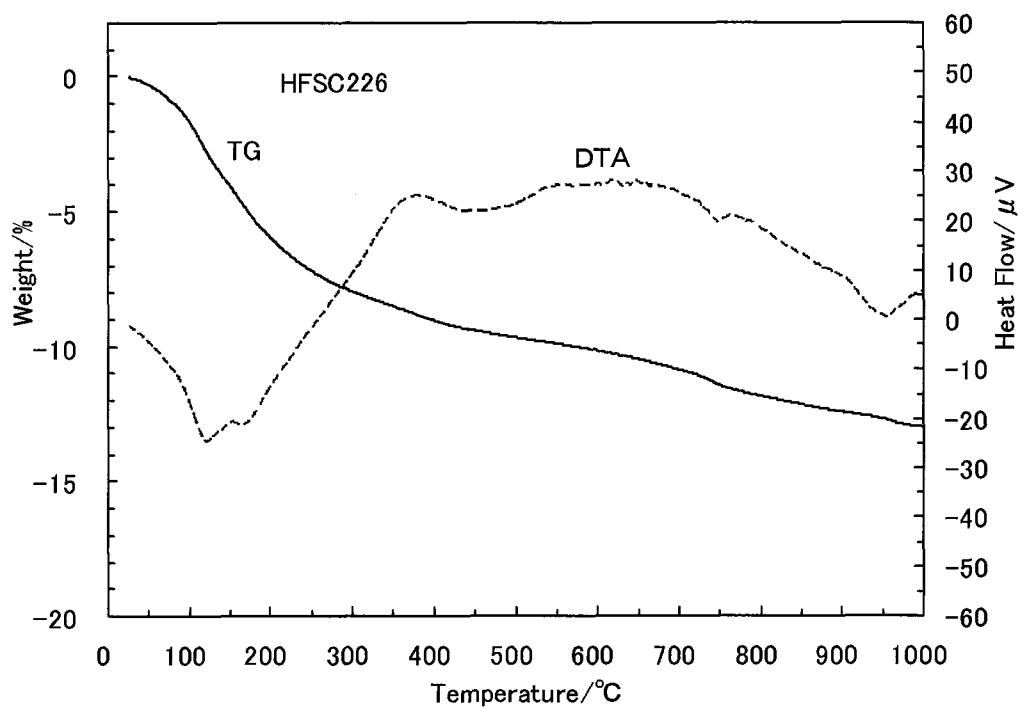


図 4.5-1 HFSC226 硬化ペースト試料の TG-DTA チャート

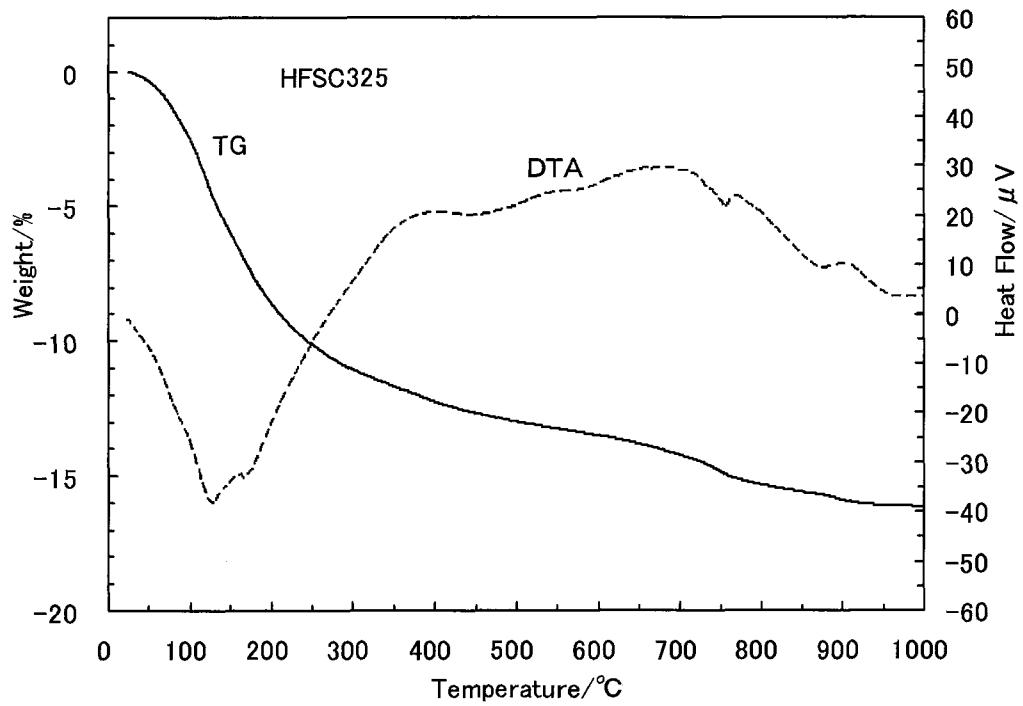


図 4.5-2 HFSC325 硬化ペースト試料の TG-DTA チャート

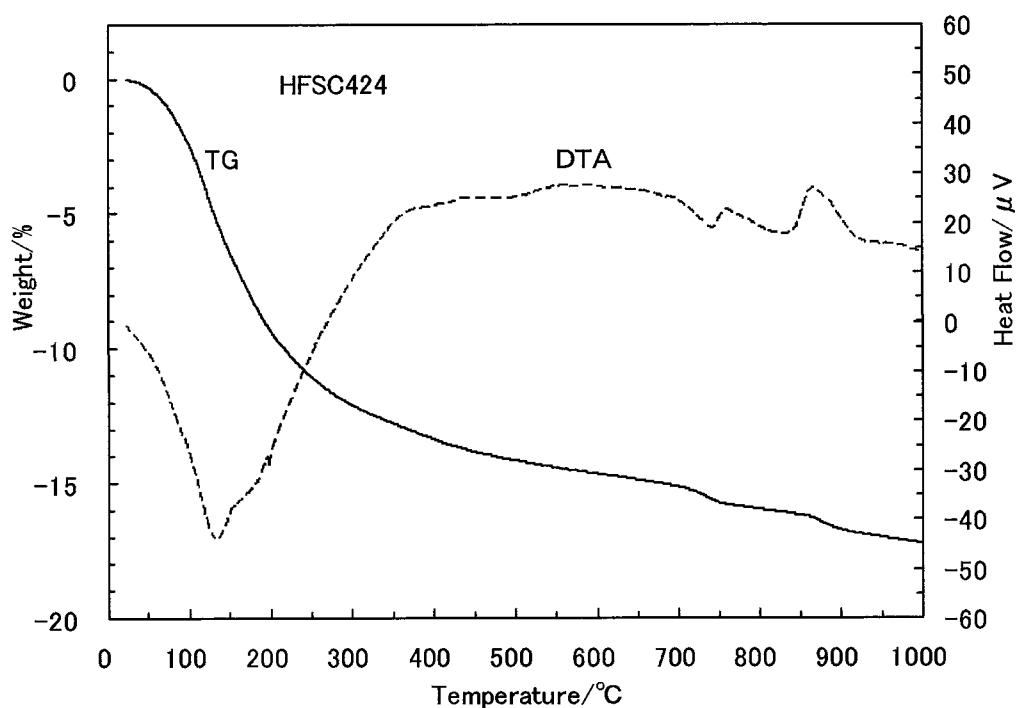


図 4.5-3 HFSC424 硬化ペースト試料の TG-DTA チャート

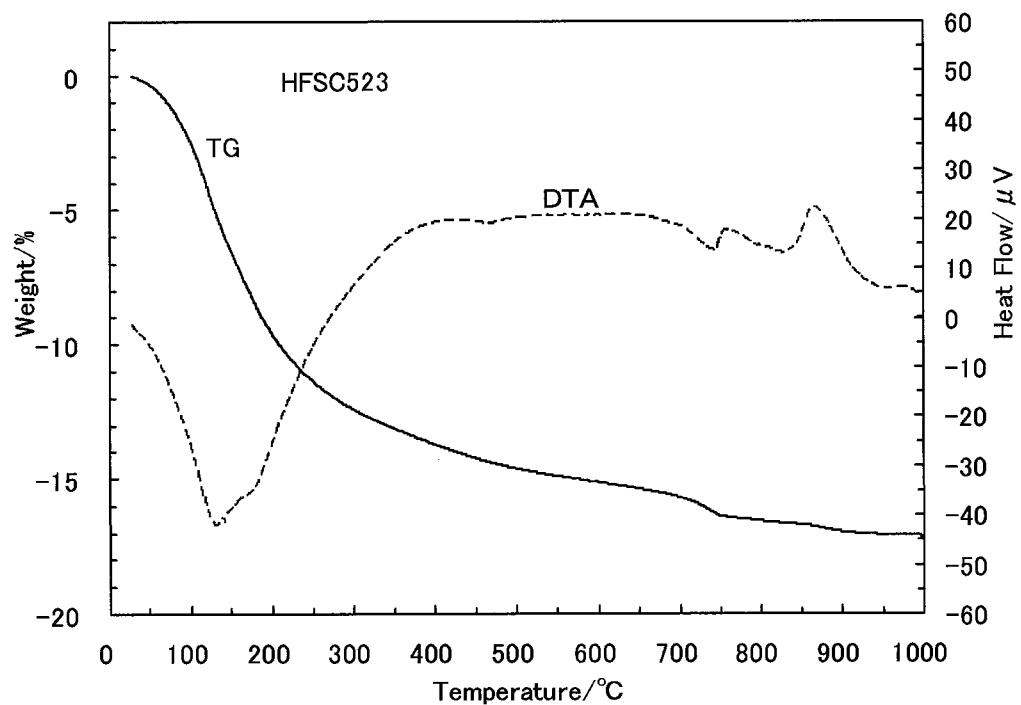


図 4.5-4 HFSC523 硬化ペースト試料の TG-DTA チャート

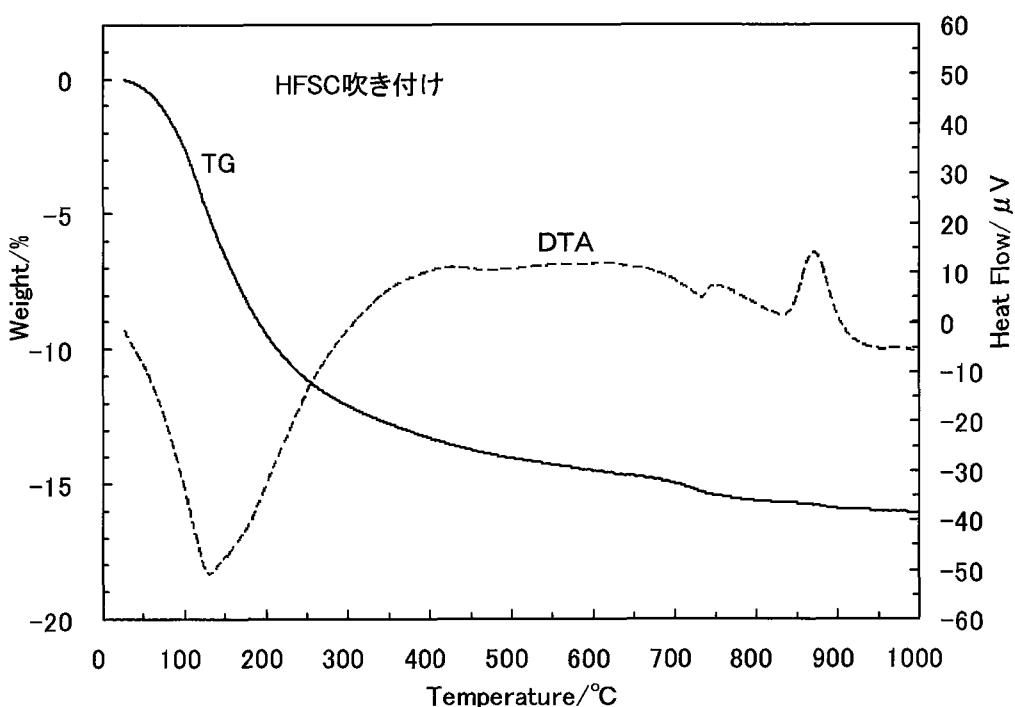


図 4.5-5 HFSC 吹付け硬化ペースト試料の TG-DTA チャート

TG-DTA による水和物の定量結果を表 4.5-1 に示す。

450°C付近で減量するポルトランダイト（水酸化カルシウム）は全てのケースで検出されなかった。HFSC523 と吹付けは、平成 17 年度（28 日材齢）ではポルトランダイトが検出されていたことから、ポゾラン反応によりポルトランダイトが消費されたものと判断される。

750°C付近で減量するカルサイト（炭酸カルシウム）は、いずれのケースでも存在が確認された。結晶水量は OPC 含有量に相関が認められ、OPC 量が多いケースほど CSH 等の水和物量が多いことが考えられる。

表 4.5-1 硬化体試料の定量結果

ペースト	材齢 (日)	含有量 (wt%)		
		結晶水	portlandite	calcite
HFSC226	1547	7.38	N.D.	0.49
HFSC325		9.76	N.D.	0.99
HFSC424		10.92	N.D.	0.81
HFSC523	364	11.26	N.D.	1.15
HFSC 吹付け		10.76	N.D.	0.54

結晶水 : 100~400°C の減量

N.D. : 検出下限値 (約 0.1%) 以下

Portlandite : 水酸化カルシウム  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Calcite : 炭酸カルシウム  $\text{CaCO}_3$

## (2) 化学分析

化学分析結果を表 4.5-2 に示す。

いずれも平成 17 年度と大きな差異の無い値となった。HFSC226, 325, 424, 523 ではOPC 量が多い順に、CaO の含有量が多くなっている。逆に、SiO<sub>2</sub>とAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>はOPCよりもFAに多く含まれていることから、FA量が多いケース（SFは各ケースとも 20%で不変）ほどその含有量が多くなっている。HFSC吹付けでは、Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>OおよびSiO<sub>2</sub>がやや高い値となっており、急結剤の影響が出ていると考えられる。

表 4.5-2 硬化ペースト試料の化学分析結果

ペースト	材齢 (日)	含有量 (wt%)				
		CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
HFSC226	1547	13.4	50.9	16.9	0.23	0.52
HFSC325		19.0	44.6	13.8	0.21	0.46
HFSC424		22.7	41.8	12.0	0.22	0.42
HFSC523	364	27.5	40.8	9.3	0.23	0.38
HFSC 吹付け		22.5	47.4	8.6	0.36	0.59

## (3) 元素分布

EPMAによる直径断面の各元素のマッピング結果を図 4.5-6～図 4.5-10 に示す。

CaO, SiO<sub>2</sub>およびAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は、試料周縁部で溶脱した形跡は確認されなかった。これは水中養生時の液固比が 1 以下程度と小さかつたためと推察される。CaO絶対量はOPC量が多いケースほど含有量が多くなっている。一方で、溶出し易いNa<sub>2</sub>OおよびK<sub>2</sub>Oは周縁部から溶出した形跡が認められた。Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>Oの溶出は特に円板側面で大きい。これは、浸漬中に円柱端面（円形の面）が他の供試体の端面と重なっていたことが原因の 1 つとして考えられる。

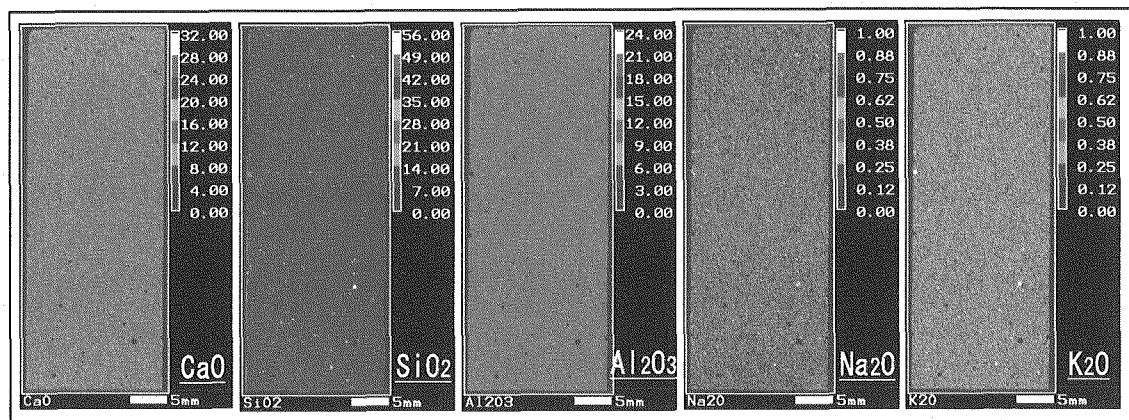


図 4.5-6 EPMA による HFSC226 硬化体（材齢 1547 日）の元素分布測定結果

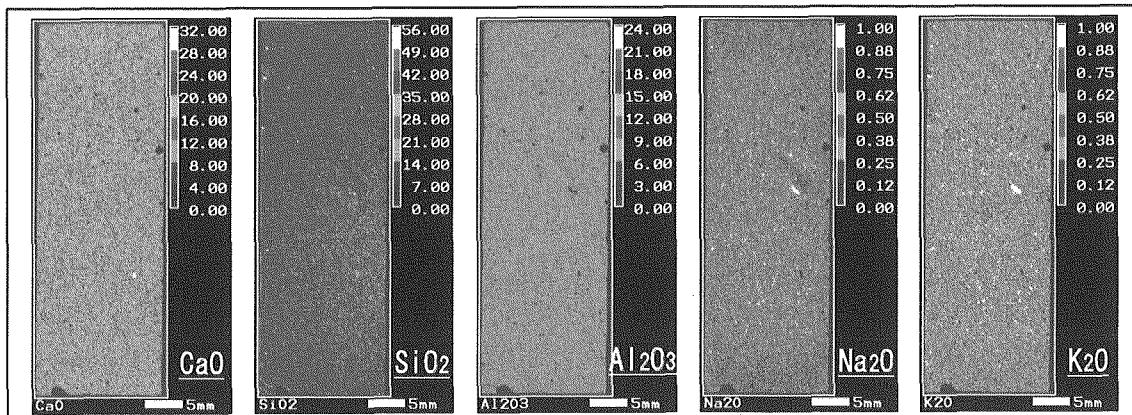


図 4.5-7 EPMA による HFSC325 硬化体（材齢 1547 日）の元素分布測定結果

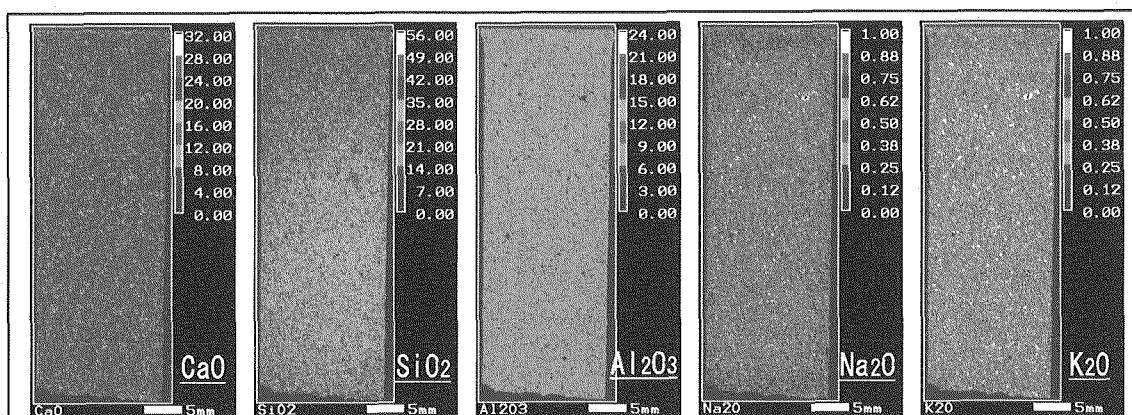


図 4.5-8 EPMA による HFSC424 硬化体（材齢 1547 日）の元素分布測定結果

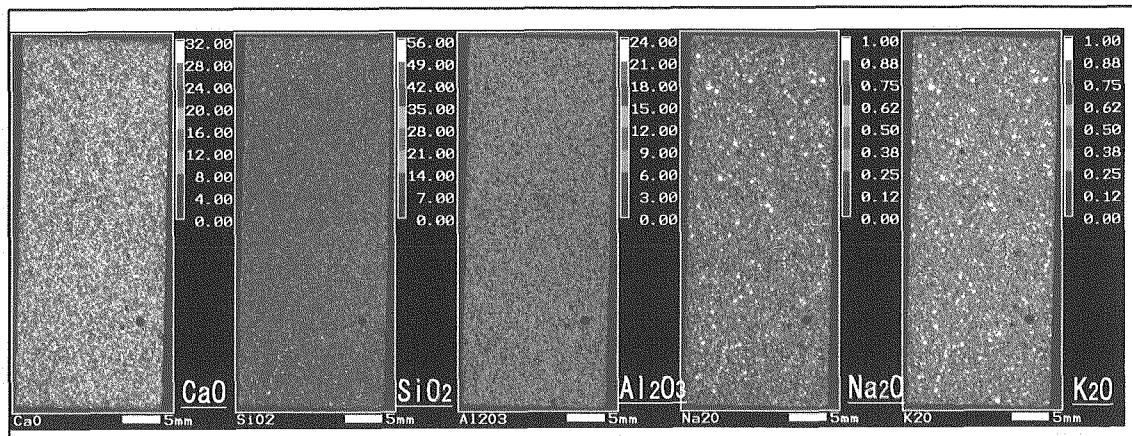


図 4.5-9 EPMA による HFSC523 硬化体（材齢 364 日）の元素分布測定結果

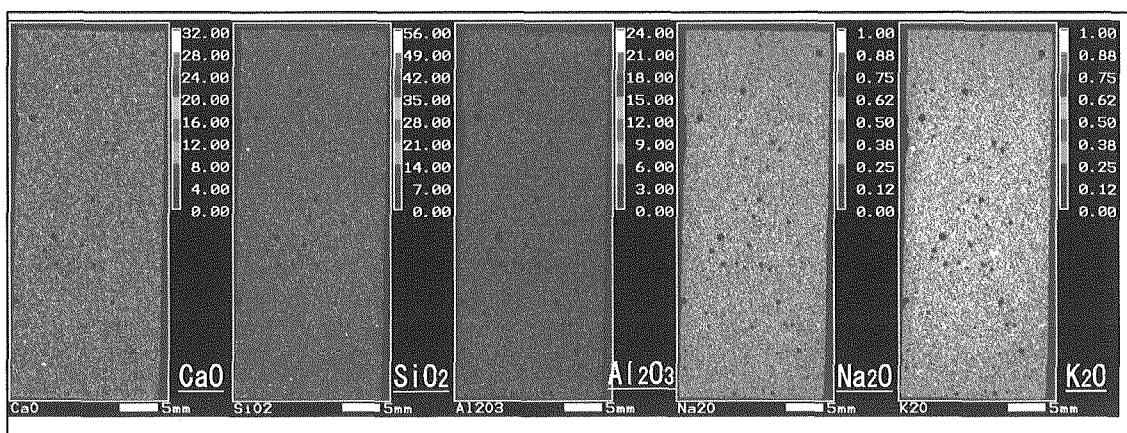


図 4.5-10 EPMA による HFSC 吹付け硬化体（材齢 364 日）の元素分布測定結果

#### 4.5.2 液相分析

##### (1) pH 測定

養生水（円板状供試体浸漬水）の pH 測定結果を表 4.5-3 に、浸漬水の pH 値の経時変化を図 4.5-11 に示す。

長期浸漬している HFSC226, 325, 424 の 3 ケースでは、pH は平成 17 年度より少し低下した。HFSC523 および 424 吹付けは平成 17 年度から開始したため試験材齢が短期間であり、ポグラン反応が不十分で pH が 12 を超えていたが、今回の測定では他の 3 ケースより大きく pH が低下していた。

表 4.5-3 養生水の pH 測定および組成分析結果

ペースト	材齢 (日)	液相濃度 (mmol/L)							pH
		Ca	Si	Al	Na	K	SO <sub>3</sub>	Cl	
HFSC226	1547	0.8	1.5	0.06	5.7	1.7	1.74	0.24	11.52
HFSC325		0.3	2.5	0.04	3.9	1.8	0.21	0.04	11.48
HFSC424		0.3	1.3	0.07	2.4	1.3	0.12	0.03	11.53
HFSC523	364	0.5	0.6	0.07	2.1	1.4	0.10	0.09	11.80
HFSC 吹付け		0.5	2.5	0.04	3.0	2.2	0.12	0.14	11.58

注) HFSC523 および HFSC 吹付け円盤を粉碎した試料の平衡水の pH は、上記の養生水の pH より若干高い値が得られた。

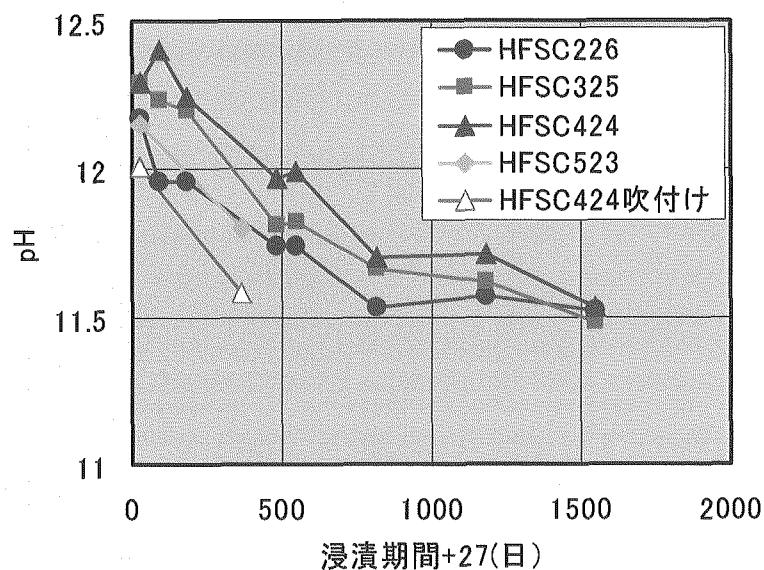


図 4.5-11 浸漬水の pH 値の経時変化

## (2) 組成分析

養生水（円板状供試体浸漬水）の組成分析結果を表 4.5-3 に示す。

各成分の濃度はHFSC226, 325, 424 の 3 ケースでは、平成 17 年度に得られた結果<sup>2)</sup>と同様の傾向を示し、大きな変化は無かった。

HFSC523 および吹付けの Ca 濃度は、平成 17 年度は 1.0mmol/l を超えるやや高い濃度であったが、今回は長期浸漬している他の 3 ケースと同様に 1.0mmol/l 以下となり水和反応の進行が影響しているものと推察される。いずれも Ca 濃度は水酸化カルシウムの飽和濃度（約 22mmol/l）に比べるとかなり低く、Na および K が pH に与える影響が大きくなっている。

Si 濃度は Ca 濃度とは逆に、平成 17 年度に低濃度であった HFSC523 および吹付けの 2 ケースで上昇が認められたが、HFSC226, 325, 424 の 3 ケースでは、Si, Ca 濃度とともにセメント組成と単調に相関しない結果となった。

## 5. まとめ

原位置施工試験の計画について、平成 17 年度の成果<sup>2)</sup>を踏まえ、各種試験データが最も豊富な HFSC424N を吹付けコンクリートとして使用することを前提に、以下の①～⑤の前提条件を考慮して検討した。

- ① 実際の地下空洞構築の際に、支保工としての適用可能であることの実証
- ② 周辺の地質環境に与える影響を把握する手法・評価評価しうる手法の構築
- ③ 幌延の地下施設における地下水平坑道 140m での実施
- ④ 試験期間 10 年程度
- ⑤ 普通コンクリートを使用した支保工と比較が可能であること

ベースコンクリートの配合選定試験は、平成 17 年度と異なり、セメント、粗骨材、細骨材および高性能 AE 減水剤を幌延の地下施設建設で使用される銘柄のものを用いて、吹付け用コンクリートのベース配合での配合試験および急結性状確認試験を実施した。この結果、水結合材比をこれまでの 40%から 35%程度に小さくすることにより、地下施設の設計で示された設計基準強度を満足するコンクリートの基本配合を選定した。

コンクリート材料の pH 低下挙動の把握では、イオン交換水に浸漬していた試料の pH 測定を継続した。この結果、平成 14 年度から約 4 年間浸漬している HFSC226, 325, 424 のペースト試料の浸漬水の pH は、平成 17 年度より低下した。また、平成 17 年度から 1 年間浸漬している HFSC424 吹付けのペースト試料の浸漬水の pH は 11.6 を示し、低下を継続している。

今後、幌延の地下施設の水平坑道の一部において吹付けコンクリートの施工試験を行なうにあたって、原位置での材料・機械を用いて吹付けコンクリートの施工性状を確認するとともに、長期的な浸漬液の pH の低下挙動を把握していく必要がある。

今後の課題を以下に示す。

### ○原位置試験での製造プラント

現場でのベースコンクリートの製造は、地下施設工事で供用中のコンクリート製造設備を使用することを計画している。しかし、セメントサイロは、高炉 B 種セメントと早強セメント、フライアッシュが貯蔵されており、低アルカリ性コンクリートの製造に必要な普通ポルトランドセメントが貯蔵されていない。HFSC の供給方法として以下の 4 つが考えられ、品質管理の方法などを考慮しつつ、今後の調整を進める必要がある。

- ① 現場外の生コンプレントから供給する。
- ② 現場のセメントサイロの 3 基のうち、1 基に普通セメントを貯蔵する。
- ③ 現場のセメントサイロを 1 基増設する。
- ④ HFSC を用いた吹付けコンクリートの施工試験用製造プラントを構築する。

### ○原位置試験の試験工程

工学技術の適用性検討に関する計画案<sup>1)</sup>によると、140m の地下水平坑道の構築は平成 19 年 7 月より換気立坑から開始と、平成 19 年 11 月より東立坑から開始としているが、工期が変更され

ることも考えられる。そのため、原位置試験は実際の掘削進捗に応じて柔軟に進めることが必要となる。

#### ○原位置での吹付けコンクリートの性状確認

本研究においては、セメント、シリカフューム、フライアッシュなどのHFSC材料と、粗骨材、細骨材などの骨材は、実際に現地で使用される鉛柄のものを用いた。しかしながら、HFSC材料は、その原材料の産地・採取時期・配合が変われば、成分などが厳密には変わることも想定される。また、本研究では練混ぜ機械は室内試験室用のものを用いているが、実際には実工事用のプラントにより練り混ぜた後、地下140mまで運搬して吹付ける。したがって、実工事の直前には、本検討で選定した基本配合を元に、実際に使用する材料・機械を用いて練混ぜ後に地下に運搬して、実際の吹付け性状を確認しておく必要がある。

#### ○浸漬液のpHの低下挙動の把握

HFSC424の吹付けコンクリートを20°Cで1年間水中浸漬すると、セメントペースト硬化体の浸漬液のpHは11.6まで低下したが、低下割合が小さい。これまで実施してきた研究では、HFSC424の粉体セメントペースト硬化体を65°C程度で2ヶ月間養生すると、pHは11程度に低下することが確認<sup>3)</sup>されており、常温においても長期的には浸漬液のpHは徐々に低下していくものと考えられる。環境温度は、地下施設では30°C程度、処分場では40~60°Cと考えられることから、温度の影響を考慮した研究が必要と考えられる。

## 参考文献

- 1) 青柳茂男, 油井三和, 棚井憲治, 川上進, 藤田朝雄, 谷口直樹, 柴田雅博, 小西一寛, 西村繭果, 菊池広人, 松本一浩, 松井裕哉, 中山雅：“幌延深地層研究計画第2段階（平成17～21年度）を対象とした工学技術の適用性検討に関する計画案”, JAEA-Review 2006-014 (2006).
- 2) 小西一寛, 中山雅, 三原守弘, 吉田泰, 入矢桂史郎, 秋好賢治, 納多 勝：“幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメントを用いた吹付けコンクリートの施工性に関する研究”, JAEA-Research 2006-040 (2006).
- 3) 入矢桂史郎, 三上哲司, 秋好賢治, 上垣義明：“幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究(II)”, JNC TJ8400 2002-013 (2002).
- 4) 入矢桂史郎, 三上哲司, 竹田宣典, 秋好賢治：“幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究(III)”, JNC TJ5400 2003-002 (2003).
- 5) 入矢桂史郎, 田島孝敏, 納田勝：“幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究(IV)”, JNC TJ5400 2004-008 (2003).
- 6) 入矢桂史郎, 栗原雄二, 納田勝：“幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究(V)”, JNC TJ5400 2004-003 (2004).
- 7) (社)土木学会コンクリート委員会：“コンクリートライブライアリ-121, 吹付けコンクリート指針(案)” (2005).
- 8) 松永浩一, 田村彰教, 村川史朗, 西山誠治, 青木七郎, 布施正人, 興三智彦, 高橋剛弘：“幌延深地層研究計画, 地下施設実施設計・設計報告書”, JNC TJ5410 2005-002 (2005).
- 9) 東横エルメスホームページ : <<http://www.elmes.co.jp/>>.
- 10) 東京測器研究所：製品総合カタログ 2005-2006 <<http://www.tokyosokki.co.jp/>>.
- 11) 小林一輔：“コア採取によるコンクリート構造物の劣化診断法”, 森北出版 (1998)
- 12) 非破壊検査研究会：“コンクリート構造物の検査・診断－非破壊検査ガイドブックー”, 理工図書 (2003).
- 13) 日本分析化学会北海道支部編：“水の分析”, 第4版, 化学同人 (2005).
- 14) H. Owada et al.: Radioactive Waste Management and Environmental Remediation - ASME 1999: Nagoya, Japan (1999).
- 15) 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構：“TRU廃棄物処分技術検討書－第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ”, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).
- 16) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ一分冊3 地層処分システムの安全評価”, JNC TN1400 99-023 (1999).
- 17) 青山裕司, 高瀬博康：“亀裂内不均質性を考慮した流体解析コードの開発”, JNC TJ8400 2003-001 (2003).

- 18) H. Ueda: "Numerical evaluation of cement-bentonite interactions in a HLW repository", ICONE 15, (2007).
- 19) J. Cama, J. Ganor, C. Ayora and C. A. Lasaga : "Smectite dissolution kinetics at 80°C and pH8.8", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol.64, No.15, pp.2701-2717 (2000).
- 20) H. Takase.: "Discussion on PA model development for bentonite barriers affected by chemical interaction with concrete: Do we have enough evidence to support bentonite stability?", Proceeding of the International Workshop on Bentonite-Cement Interaction in Repository Environments, NUMO -TR-04-05, pp.A3-107—A3-112 (2004)
- 21) F. Renard, J.-P. Gratier, P. Ortoleva, E. Brosse and B. Bazin : "Self-organization during reactive fluid flow in a porous medium", *Geophys. Res. Lett.*, 25(3), pp.385–388 (1998).

## 付録 1

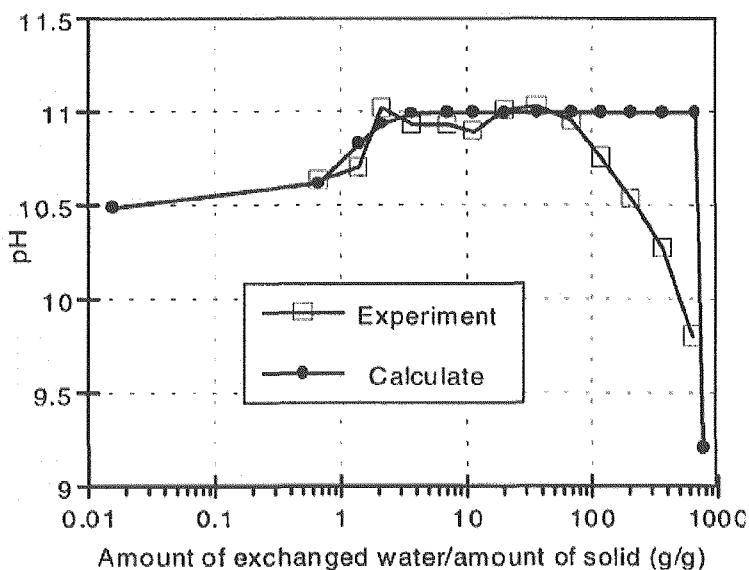
1. 低 pH セメント (HFSC) の浸出挙動のモデル化の例
2. 初生鉱物の溶解 (ベントナイトの事例)
3. 二次鉱物の沈殿 (ベントナイトの事例)
4. 変質部の物質移行特性の変化 (ベントナイトの事例)
5. RAIDEN 3 の概要

## 1. 低pHセメント（HFSC）の浸出挙動のモデル化の例<sup>1)</sup>

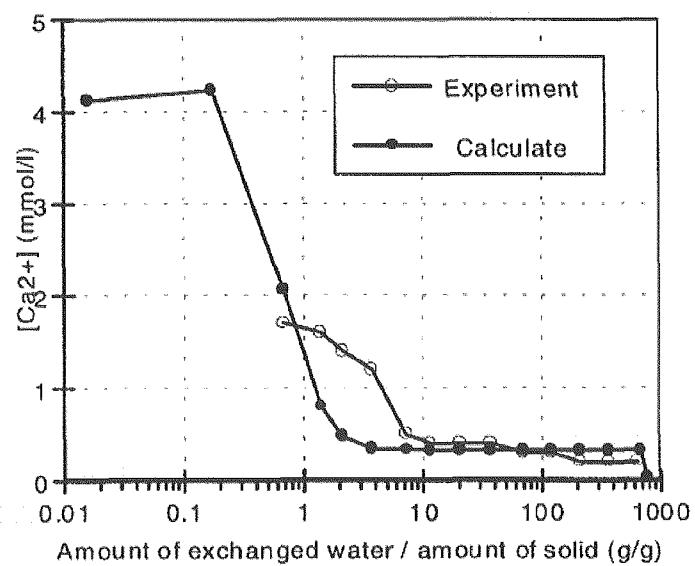
### 1.1 杉山モデルの浸出試験結果への適用性の評価

#### 1.1.1 HFSCについての浸出試験

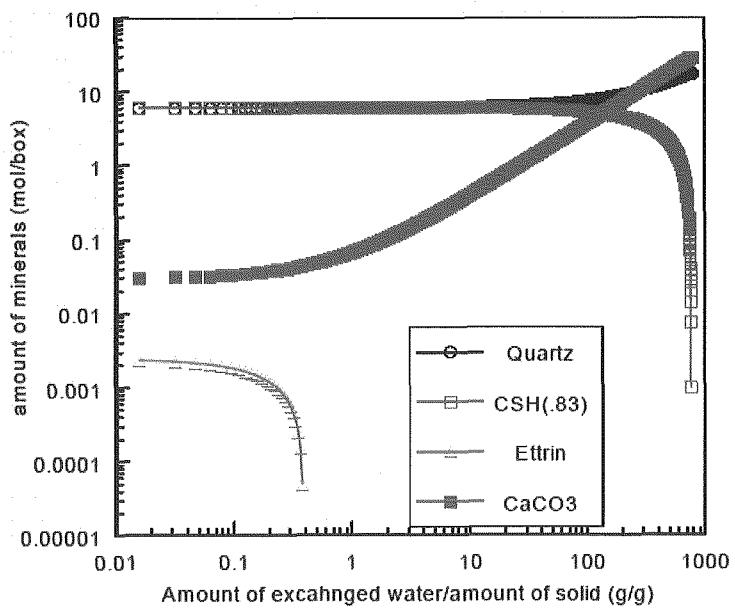
低pHセメントの候補材料の一つであるHFSCは、シリカフュームを混入することで初期のC/S比を低下させることによって反応水のpH上昇を抑制することを目指したものである。HFSCの浸出挙動については、Owadaら<sup>2)</sup>によってカラム試験およびその結果に対する解析が実施されている。図補1.1-1および図補1.1-2に実験結果と解析結果の比較を示す。また図補1.1-3は、HFSC中のシリカフュームが全て反応してOPCとともにCSHゲル（初期のC/S比=0.83）を形成するという仮定の下にAtkinsonモデルによって算出した鉱物組成の時間変化である。なお、Owadaらの解析では、Santa Chemコードが用いられている。実験結果は、初期に微量含まれるエトリンガイトの存在している期間においては浸出液のpHは10.5程度であるが、エトリンガイトの消失に伴い11程度まで上昇することを示している。また、通水量の増大に伴ってCSHゲルが溶出するものと考えられ、CSHゲルの量が低下するのに伴ってpHが低下する傾向を示している。なお、Owada等の解析では、本来は固溶体であるCSHゲルを单一のend memberによって表現しているため、pHの低下が急激に生じている点が実験とは顕著に異なる。



図補1.1-1 カラム試験における浸出液pHの時間変化<sup>2)</sup>



図補 1.1-2 カラム試験における浸出液中Ca濃度の時間変化<sup>2)</sup>



図補 1.1-3 カラム試験における鉱物組成変化についての解析結果<sup>2)</sup>

### 1.1.2 杉山モデルによる解析結果

Atkinson モデルとは異なり、固溶体モデルである杉山モデルにおいては、C/S 比を連続的に変化させることができある。そこで、ここでは表補 1.1-1 および表補 1.1-2 に対応する条件で杉山モデルを用いた解析を実施し、HFSC セメントの浸出挙動を杉山モデルにおいて初期の C/S 比を低く設定することにより再現することが可能か否かを調べることとした。解析結果を図補 1.1-4 ～図補 1.1-6 にまとめた。

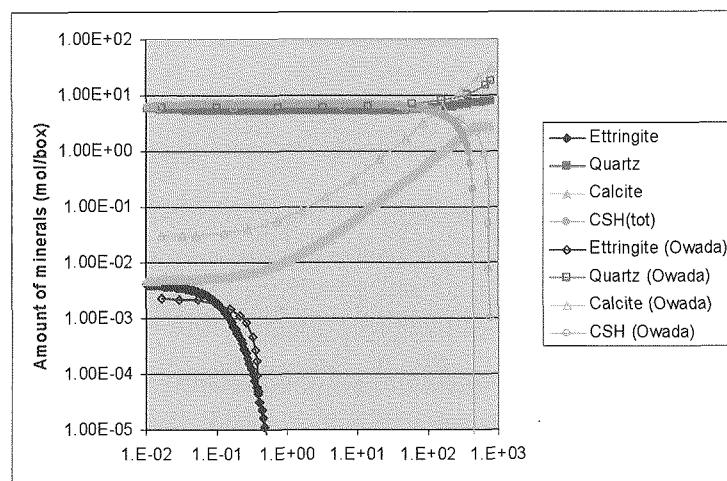
解析結果は、固相の性状、pH および Ca 濃度の時間変化をほぼ再現していると考えられることから、HFSC については、このモデルを用いて処分場環境におけるベントナイトへの影響のモデル化を行うことが妥当であると考えられる。なお、ここで、初期の高い Ca 濃度はエトリンガイトの溶解によるものであり、溶解速度 (Owada らは瞬時平衡と仮定している) によって変動するものと考えられる。実験結果からは、エトリンガイトの溶解が遅く、これが解析と実験結果との差異の一つの要因になっているものと考えられる。しかしながら、実際の処分場環境では流速は実験条件よりもはるかに小さいため、瞬時平衡の仮定は妥当であると考えられる。

表補 1.1-1 初期鉱物組成<sup>2)</sup>

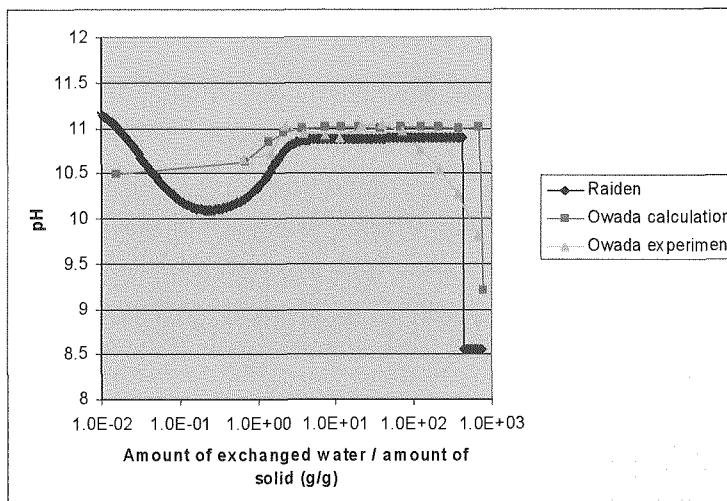
minerals	amount(mol/box)	remark
C-S-H	6.052	assumed
AFt	$4.274 \times 10^{-3}$	Ca/Si=0.83
Quartz	5.922	

表補 1.1-2 試験条件<sup>2)</sup>

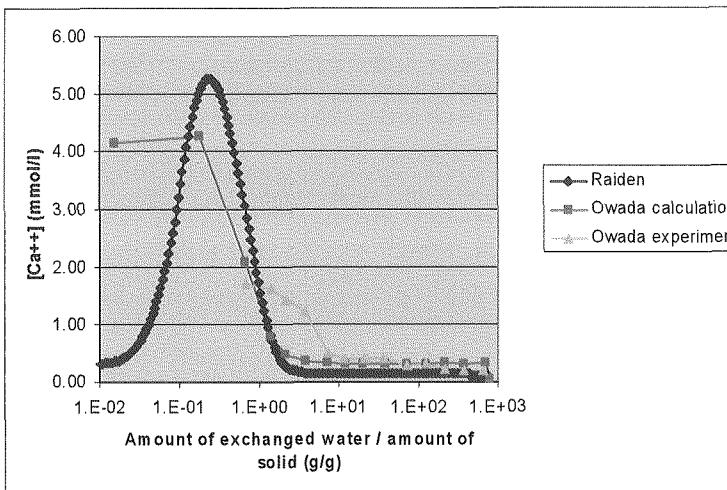
solid/liquid ratio	5kg/10litter
Darcy velocity	$3.15 \times 10^{-2}$ m/year
box length	1m
porosity	0.82
Time-Step	$5.0 \times 10^{-1}$ year



図補 1.1-4 杉山モデルにより算出した鉱物組成の時間変化



図補 1.1-5 杉山モデルにより算出した液相中 pH の時間変化



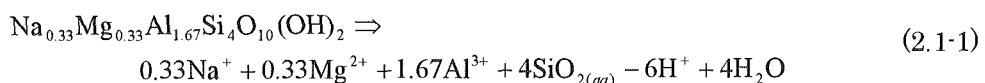
図補 1.1-6 杉山モデルにより算出した液相中 Ca 濃度の時間変化

## 2. 初生鉱物の溶解（ベントナイトの事例）

たとえば OPC と反応した溶液は、初期には Na および K に富む pH13 以上の高アルカリ性を呈し、アルカリ成分が溶出した後には、ポルトランダイトの溶解平衡により規定される pH (12.5 程度)で Ca に富むものとなる。その後、長期的には、セメントの主成分である CSH ゲルの Ca/Si 比の低下に伴い pH および Ca 濃度は徐々に低下する。そこで、このようなセメントと反応した溶液組成の時間的変遷に対応して、Na や K に富む pH13 以上の高アルカリ溶液やポルトランダイト平衡溶液あるいはそれ以下の pH といった幅広い初期条件の溶液中でのベントナイトの反応試験が行われている。また、ベントナイト緩衝材に期待される止水性やコロイドフィルタといった性能は膨潤性を有するモンモリロナイトによるところが大きいことから、モンモリロナイトの溶解速度を評価する研究も実施されている。

### 2.1 モンモリロナイトの溶解反応

モンモリロナイトの溶解反応は次式のように表される<sup>3)</sup>。



高pH条件では、シリカの溶存化学種の加水分解により  $\text{SiO}_2(aq)$  種濃度が低下するためモンモリロナイトの溶解が進展することとなる。また、鉱物の溶解の進展に伴い、閉鎖系で二次鉱物の沈殿が生じない場合には反応生成物である溶存化学種の濃度は徐々に上昇し、いずれは溶解している鉱物との平衡に到達して溶解が停止するものと考えられる。Lasaga<sup>4)</sup>は、鉱物の溶解反応についてこの飽和度に関する影響を考慮した一般式を次のように提案している。

$$Rate = k_o \cdot A_{min} \cdot e^{-E_{app}/RT} \cdot a_{H^+}^{n_{H^+}} \cdot \prod_i a_i^{n_i} \cdot g(I) \cdot f(\Delta G_r) \quad (2.1-2)$$

ここで、 $k_o$  は定数、 $A_{min}$  は鉱物の反応表面積、 $E_{app}$  は見かけの活性化エネルギー、 $R$  は気体定数、 $T$  は絶対温度、 $a_i$ 、 $a_{H^+}$  は溶存化学種  $j$  やプロトンの活量、 $n_i$ 、 $n_{H^+}$  は反応次数、 $g(I)$  はイオン強度(I)の関数、 $f(\Delta G_r)$  は反応のギブスの自由エネルギーの関数である。

上式の  $e^{-E_{app}/RT}$  は温度の影響、 $a_{H^+}^{n_{H^+}}$  は pH の影響、 $\prod_i a_i^{n_i}$  は  $\text{H}^+$  および  $\text{OH}^-$  を除く触媒・抑制作用を示す溶存種の活量の影響、 $g(I)$  は反応溶液のイオン強度の影響を、そして  $f(\Delta G_r)$  は平衡からのずれ、つまり飽和度に関する影響を示している。

モンモリロナイトの溶解に対する第一の律速機構は溶解反応そのものであり、平衡から十分離れた状況での本質的な反応速度、言い換えると上式の  $f(\Delta G_r)$  を除いた部分と、平衡への接近に伴う速度低下、つまり  $f(\Delta G_r)$  に相当する部分という 2 つの観点から多くの試験・研究が行われている。

### 2.1.1 平衡から離れた系での溶解速度

種々のpH条件においてこれまでに取得された平衡から離れた系でのモンモリロナイトの溶解速度は中性付近で極小値を示し、酸性およびアルカリ側で増大する傾向を示す<sup>5)</sup>。ただし、これら既往の研究結果は、実験方法（バッチ試験あるいはフロースルー試験）、試料（純粋なスメクタイト、天然のベントナイト、加工後のベントナイト等）あるいは温度等の実験条件が異なるため、平衡から十分離れた系におけるモンモリロナイト溶解速度のpH依存性を体系的に理解するためにはデータの拡充を図る必要があった。

そこで、Satoら<sup>6)</sup>は、純粋なスメクタイト試料を用いて種々の温度（30°C～70°C）およびpH条件（8～13）におけるフロースルー試験によりモンモリロナイト溶解速度の測定を行った。また、微小なモンモリロナイト片の溶解挙動をAFM (Atomic Force Microscopy)によって直接観察することによって溶解速度を算定し、フロースルー試験で測定された溶解速度を検証するとともに、高アルカリ条件での溶解に寄与する活性な表面の同定と溶解機構の理解を試みた。その結果、いずれの試験方法によっても整合的な溶解速度が得られ、また、高アルカリ条件でのモンモリロナイトの溶解はEdge surfaceにおいて選択的に生じていることが明らかとなった。Satoらは、また、この結果に対して、Cama<sup>7)</sup>によって提案されたtwo parallel reaction pathsモデルを適用することによって、温度およびpHの関数としてのモンモリロナイト溶解速度を次のように求めている。

$$\text{Rate} = \left( 4.74 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-39.57/RT} \cdot \frac{177 \cdot e^{2037/RT} \cdot a_{OH}}{1 + 177 \cdot e^{2037/RT} \cdot a_{OH}} + 1.70 \cdot e^{-69.67/RT} \cdot \frac{0.0297 \cdot e^{23.53/RT} \cdot a_{OH}}{1 + 0.0297 \cdot e^{23.53/RT} \cdot a_{OH}} \right) \cdot A_{min} \quad (2.1 \cdot 3)$$

Rate: モンモリロナイト溶解速度 [mol s<sup>-1</sup>] (O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>単位とする)

Amin: 鉱物の反応表面積 [m<sup>2</sup>]

T: 絶対温度[K]

R: 気体定数[kJ K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>]

このSatoら<sup>6)</sup>により定式化された溶解速度は、平衡から十分離れており、2.1・3式に示される溶解速度式において飽和度依存性を示す関数f(ΔGr)を1と置いたときの速度式と考えることができる。

### 2.1.2 平衡に接近した系での溶解速度

溶質の移行を伴う開放系では、固相の溶解に伴う溶存化学種の濃度の上昇は同時に物質移行速度の増大をもたらすこととなり、溶解反応速度と物質移行速度の均衡するような準定常状態が達成されることとなる。また、二次鉱物の生成が顕著である場合には、反応生成物の一部は沈殿によって液相から除去されるため溶解反応は平衡に達することはなく継続して生じることとなる。しかしながら、不均一系において溶解反応が生じたとき、緩衝材として用いる圧密ベントナイトのように固相の反応表面積に比して著しく液相量が少ない場合(反応表面積が固相量と正の相関

がある場合には低液固比と見て良い場合には、液相濃度は容易に上昇し、反応速度に及ぼす飽和度(平衡状態への接近の程度)の影響を無視することはできない。

平衡に接近した場合のモンモリロナイト溶解速度の低下については、流入液のSi濃度を調整することによってモンモリロナイトの溶解に関する飽和度を管理したフロースルー試験によって調べられている<sup>8)</sup>。実験結果は、Si濃度が高く飽和に近い条件ではモンモリロナイトの溶解速度が顕著に低下していることを示した。この実験結果に対して、Camaら<sup>8)</sup>は、以下の3種類の溶解速度に対する飽和度依存性の式に従い整理することを試みている。

### 2.1.2.1 遷移状態理論に基づくモデル

遷移状態理論モデルでは、ギブスの自由エネルギーの関数、 $f(\Delta G_r)$ は、

$$f(\Delta G_r) = 1 - \exp\left(\frac{\Delta G_r}{\sigma RT}\right)$$

$\Delta G_r$ : 反応のギブス自由エネルギー変化 [kJ mol<sup>-1</sup>] (2.1-4)

$\sigma$ : Temkin 化学量論係数

として定式化される。このモデルは遷移状態理論という明確な理論的基礎を有するが、反面、Camaら<sup>8)</sup>の実験データにおける溶解速度の飽和度依存性を再現できない点や、このモデルが理論的な適用性を有するのは、溶解反応の律速段階が常に可逆な単一のステップによって構成される場合に限られるといった短所を有する。

### 2.1.2.2 非線形モデル

非線形モデルは、遷移状態理論に対して以下のように二つの調整パラメータ (m および n) を付加することによって自由度を増した経験式である (m=n=1 の場合が遷移状態理論に該当する)。

$$f(\Delta G_r) = 1 - \exp\left(m\left(\frac{\Delta G_r}{\sigma RT}\right)^n\right) \quad (2.1-5)$$

このモデルは、Camaら<sup>8)</sup>のpH8.8での実験データにおける溶解速度の飽和度依存性に対するフィッティングによって求められている。また、この非線形モデルは酸性領域でのモンモリロナイトの溶解速度、並びにギブサイトやアルバイトの溶解速度にも適用されており<sup>9),10),11),12),13)</sup>、理論的な根拠が明確ではないものの試験結果への適合性という点では優れている。ただし、Camaら<sup>8)</sup>がpH 8.8で求めた調整パラメータの高アルカリ条件への適用性は未確認であることに注意を要する。

### 2.1.2.3 Silica inhibition モデル

$$Rate = \frac{a}{1+bC_{Si}} \quad (2.1-6)$$

このモデルは、液相中のシリカが固相の表面に吸着することにより水酸基のアタックを阻害することを仮定して、モンモリロナイト溶解速度の液相中のシリカ濃度  $C_{Si}$  への依存性を表現したものである (a, bは定数)。このモデルは、 $bC_{Si} >> 1$  の場合にはCama et al. (2000)のデータをほぼ再現することができる。このモデルの原型となっているものがMultioxide silicate モデル<sup>14)</sup>である。

モンモリロナイト溶解速度に関するこれらのモデルオプションのうち、遷移状態理論は常に可逆な単一の律速段階で進展する反応についてのものであり、Camaらの試験結果からもわかる通り、モンモリロナイトのように非線形の飽和度依存性を示す溶解反応に適用することは難しいと考えられる。また、Silica inhibitionモデルの原型となるMultioxide silicateモデルは、本来、平衡からある程度離れた系における溶解挙動を表現するもの<sup>14)</sup>であり、このモデルのみで平衡近傍までを含めた溶解挙動を記述することは困難であると考えられる。よって、モンモリロナイト溶解挙動の飽和度依存性に関して現在入手可能な唯一の公開データである<sup>8)</sup>の結果を説明することが可能であり、平衡の近傍にも適用可能であるのは非線形モデルである。なお、圧密されたベントナイト（クニピアF）とケイ砂の混合物を用いた高温のカラム試験<sup>15)</sup>において測定されたモンモリロナイト溶解量は、同じ条件を想定して非線形モデルおよび遷移状態理論に基づくモデルにより求めた値をいずれも下回っており、バッチ試験やフロースルー試験のように液固比の高い条件における溶解速度に対して、より現実的な低液固比での速度は顕著に小さいものである可能性を示唆している。また、この実験では、モンモリロナイトの組成から見ればAlに対してシリカの選択性的溶解が生じており、ケイ砂の主成分である石英がモンモリロナイトに先行して溶解している可能性がある。他方、非線形モデルおよび遷移状態理論に基づくモデルによる解析結果では、前者が石英の選択性的溶解を示すのに対して後者はむしろモンモリロナイトの溶解が先行する傾向を示していることから、この結果は、非線形モデルの適合性を示すものと捉えることもできる。ただし、この実験は高温 (80°C) で実施されたものである点や、解析上予想された下流側のpHよりも実際のpHが低いこと等の不整合な点もあるため、結果の解釈には注意を要する。

#### モンモリロナイトの溶解過程におけるイオン交換反応の影響

セメント系材料と反応した溶液と接するモンモリロナイトの反応としては、溶解に加えて、イオン交換が重要である。緩衝材に用いるベントナイト中のモンモリロナイトの層間に位置する交換性陽イオンは主にNaであり、セメントから溶出するCaやK等の陽イオンとの間でイオン交換反応が生じる。モンモリロナイトのイオン交換による液相中の陽イオンの消費や放出は間隙水組成を変化させ、セメントの溶解や後述する二次鉱物の生成反応に影響すると考えられる。このような相互影響は、さらに、モンモリロナイトの飽和度への影響、飽和度依存性を示す溶解速度への影響にも関連することとなる。

モンモリロナイトのイオン交換反応は物質移行に比して十分に速い過程であると考えられるため、人工バリアの変質に関する検討では瞬時局所平衡を達成するものと考えられる。

### ベントナイト随伴鉱物の溶解反応

ベントナイトには表補 2.1-1 に示すようにモンモリロナイト以外にも、カルセドニ、クオーツ、カルサイト、あるいはパイライトといった鉱物が含まれる。このうち、パイライトについては、処分場閉鎖後に残留する酸素が消費あるいは散逸した後には還元性雰囲気となるため、酸化および溶解反応は顕著に生じず、したがって、セメントから浸入する高アルカリに対する pH 緩衝性は顕著ではないと考えられる。他方、カルセドニやクオーツについては、高アルカリ側でのシリカの溶存化学種の加水分解により pH 緩衝性を有するものと考えられ、特に、カルセドニについては反応性が比較的高いために、反応性が低いクオーツよりも有効に pH を緩衝すると考えられる。なお、シリカを主成分とした随伴鉱物としては、アモルファスシリカを考えるべきとの意見もあり、この場合には、反応性はカルセドニよりも更に高いものとなる。また、緩衝材中のカルサイトは、炭酸の供給源として周囲の地下水とともに重要であり、セメントの反応によって豊富に存在する Ca と緩衝材中のカルサイトの溶解によって液相に供給される炭酸が反応することにより異なる部位（多くの場合はセメントとベントナイトの界面付近）にカルサイトの再沈殿が生じることとなる。このカルサイトの再配分は、後述するように、セメントとベントナイトの界面を通じた物質移行に重要な影響を与えることが予想される。

表補 2.1-1 緩衝材の仕様

パラメータ	設定値	単位
ベントナイトの平均的な真密度	$2.7 \times 10^3$	$\text{kg m}^{-3}$
ケイ砂真密度	$2.64 \times 10^3$	$\text{kg m}^{-3}$
ベントナイト配合率	70 <sup>*1</sup>	%
ベントナイトのスマクタイト含有率	48	%
間隙割合	0.40	—

表補 2.1-2 ベントナイトの鉱物組成

鉱物名	分子式	分子量	設定値
スマクタイト*	$\text{Na}_{0.33}\text{Mg}_{0.33}\text{Al}_{1.67}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	369.0	48.0%
	$\text{Ca}_{0.165}\text{Mg}_{0.33}\text{Al}_{1.67}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	368.0	
	$\text{K}_{0.33}\text{Mg}_{0.33}\text{Al}_{1.67}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	374.3	
	$\text{Mg}_{0.165}\text{Mg}_{0.33}\text{Al}_{1.67}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	365.4	
クオーツ	$\text{SiO}_2$	60.1	0.6%
カルセドニ	$\text{SiO}_2$	60.1	38.0%
プラジオクレース	$(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$	262.2	4.7%
カルサイト	$\text{CaCO}_3$	100.1	2.4%
ドロマイト	$\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$	184.4	2.4%
アナルサイム	$\text{NaAlSi}_2\text{O}_6\text{H}_2\text{O}$	238.2	3.3%
パイライト	$\text{FeS}_2$	120.0	0.6%

### 3. 二次鉱物の沈殿（ベントナイトの事例）

#### 3.1 可能性のある二次鉱物の種類

セメントと反応した溶液と接する緩衝材中でのモンモリロナイトやカルセドニ等の溶解が生じると、緩衝材間隙水中の Si や Al あるいは Mg といった溶解生成物の濃度が徐々に上昇することとなる。そして、これらの溶解反応によって緩衝された pH 条件に応じて種々の二次鉱物が過飽和となり、沈殿することとなる。ここで、生成する二次鉱物の種類によって、

- ・ 沈殿に伴い水酸基を消費あるいは生成するため、モンモリロナイトやカルセドニの溶解による pH 緩衝性に影響（促進あるいは阻害）を及ぼす
- ・ 二次鉱物に含まれる各元素の化学量論係数に応じて、モンモリロナイトやカルセドニから溶出した溶質を非調和的に消費することにより、緩衝材間隙水組成に差異が生じる
- ・ モル体積が異なるため、モンモリロナイトやカルセドニの溶解によって増大した間隙を充填する効果が異なる

ことから、現実的に生成する可能性のある二次鉱物を同定することが重要となる。小田ら<sup>16)</sup>は、セメントと反応した溶液と接する緩衝材の鉱物学的変化の可能性について、室内実験結果、関連する天然事例から得られる情報に基づき考察を行った。そして、人工バリアの化学的条件が長期にわたって大きく変化すること、その変化に伴い鉱物の熱力学的安定性が変化すること、その結果として緩衝材中で生じる二次鉱物は時間と空間によって異なる可能性があると考え、多様な系の特徴に応じて生成頻度が高いと判断された鉱物を表補 3.1-1 にまとめた。

表補 3.1-1 ベントナイトの溶解・変質に伴い生成する可能性のある主な鉱物<sup>16)</sup>

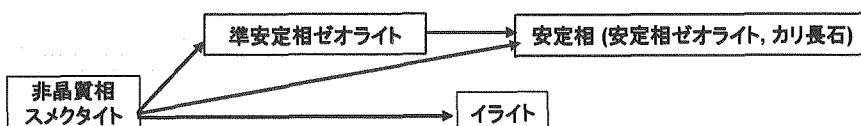
アルミニノ珪酸塩、珪酸塩、アルミン酸塩		
系	主な鉱物	
	準安定相	安定相
K·(Mg)Al·Si·H <sub>2</sub> O	フィリップサイト(Na, Ca, K) フィリップサイト(Na, Ca, K), クリノタイロライト(Na, K), ヒューランダイト(Na, Ca)	イライト, カリ長石 アナルサイム(Na), ローモンタイト(Ca)
Na·(K-)Ca·Al·Si·H <sub>2</sub> O		
Ca·(Al)·Si·H <sub>2</sub> O	CSHゲル, C <sub>3</sub> ASH <sub>4</sub> *	トバモライト, ジェナイト, アフィライト
Ca·Al·(SO <sub>4</sub> , Cl)·H <sub>2</sub> O	エトリンガイト, モノサルフェート, フリーデル氏塩	
Mg·Al·CO <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O	ハイドロタルサイト	
Mg·Si·H <sub>2</sub> O	セピオライト	
水酸化物、炭酸塩など		
系	主な鉱物	
Ca·CO <sub>3</sub>	カルサイト	
Mg·(Ca-)·(CO <sub>3</sub> , OH)	ブルーサイト, ドロマイド	

\* C<sub>3</sub>ASH<sub>4</sub> : 3(CaO) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SiO<sub>2</sub> 4(H<sub>2</sub>O)

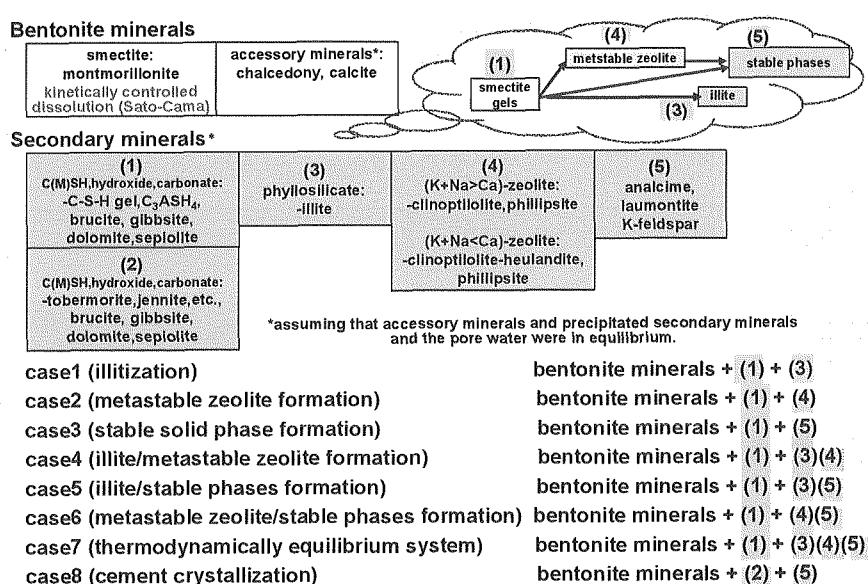
### 3.2 二次鉱物変遷のシナリオ

他方、二次鉱物の変遷は熱力学的平衡だけで決まるものではなく反応速度の影響を受ける。図補 3.2-1 に示すようなアルミニノ珪酸塩鉱物の変遷の系列は、化学的条件の変化に伴う熱力学的平衡点の変化の影響と同時に反応速度によっても強く影響され、速度論的なバランスにより熱力学的な準安定相が長期にわたって出現する<sup>17)</sup>ことを示している。しかしながら鉱物の沈殿速度についての知見は乏しく反応速度の影響を定量的に表現することは現時点では困難である。そこで、表補 3.1-1 に示した鉱物を(1)CSHゲルなど短期間で生成可能な固相、(2)アルカリ条件でスメクタイトより安定なイライト、(3)相対的に準安定なゼオライトと(4)安定なゼオライトおよびカリ長石に分類し、図補 3.2-1 の経路に対応した複数の鉱物変遷ケース（図補 3.2-2），すなわち熱力学的な観点から相対的に準安定な相が長時間にわたって存在する場合、準安定相を経て安定相へと変化する場合、比較的短い時間で局所的な熱力学的平衡が達成される場合といった複数の鉱物変遷シナリオを作成し、鉱物変遷に係わる不確実性に対処することとした。

なお、セメント反応水とベントナイトの反応の結果、出発物質のモンモリロナイトよりもMgに富む二次的なスメクタイト、たとえばサポナイトなどが沈殿する可能性<sup>18)</sup>がある。しかし、サポナイトの膨潤性や透水性はモンモリロナイトと同等あるいはそれ以上であること<sup>19)</sup>が示されており、Mgスメクタイトをはじめとするスメクタイト族間での鉱物学的変質は緩衝材の性能を著しく変化させるとは考え難い。



図補 3.2-1 アルミニノ珪酸塩鉱物についての鉱物変遷の概念<sup>16)</sup>



図補 3.2-2 複数の鉱物変遷シナリオ<sup>16)</sup>

#### 4. 変質部の物質移行特性の変化（ベントナイトの事例）

##### 4.1 実効拡散係数

緩衝材の変質について、実効拡散係数に及ぼす影響という観点からは、スメクタイト含有率の低下と間隙率の変化（二次鉱物の生成が卓越する場合には間隙率が減少し、初期鉱物の溶失が卓越する場合には間隙率が増加する）を指標として変質の程度を代表することが適切と考えられる。Mihara and Sasaki<sup>20)</sup>は、既往の研究<sup>21),22),23)</sup>において測定された圧密ベントナイト（クニゲルV1あるいはケイ砂とクニゲルV1を混合した試料）中のトリチウムの実効拡散係数測定結果を用いて、実効拡散係数を間隙割合  $\varepsilon$  およびベントナイト混合割合  $f_b$  のあるいはスメクタイト含有割合  $f_s$ （クニゲルV1に対して  $f_s = 0.48f_b$  とする）関数として表した以下の経験式を求めている。

$$\begin{aligned} De &= 2.27 \times 10^{-9} \varepsilon^n & (4.1 \cdot 1) \\ n &= 2.02 f_b^{0.13} + 1 \\ n &= 2.22 f_s^{0.13} + 1 \end{aligned}$$

ここで、ベントナイト混合割合が 0 の場合には(1.2.3-7)式の第一式における  $\varepsilon$  の指数は 1 となり、間隙の屈曲等の効果を無視して実効拡散係数は単純に間隙割合に比例するという保守的な仮定となる。上式は、スメクタイトを 95%以上含むベントナイト（クニピアF）を用いた実効拡散係数測定結果<sup>6)</sup>とも整合することが確認されている。なお、Ca型ベントナイト（100%クニゲルV1）を用いた拡散試験により、Ca型ベントナイトの実効拡散係数はNa型ベントナイトと変わらないことが確認されている<sup>24)</sup>。

##### 4.2 透水係数

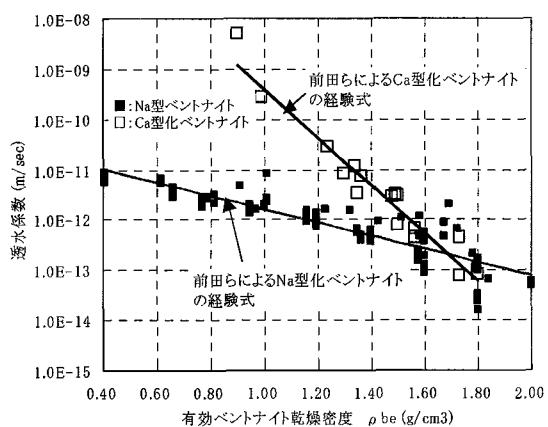
伊藤らは、高pH条件での変質を想定したクニゲルV1の透水試験結果（図補 4.2-1 参照）に対して、間隙水の当量イオン濃度 ( $C_{\text{eq}}/\text{dm}^3$ )、ベントナイトの交換性ナトリウム割合 (ESP[-I])、スメクタイト間隙比( $e_{\text{sme}}$ )[-I]をパラメータとして透水係数 ( $K$  [m/s]) を以下の実験式で示している<sup>25)</sup>。この式では、ベントナイト中のスメクタイトが溶解し消失すると（すなわち、 $e_{\text{sme}}$ が大きくなる）、透水係数は  $10^{-5}\text{m/s}$  となる。

$$K = 10^{1.30C_i} \cdot e_{\text{sme}}^{3.48C_i} K_0 \quad (4.2 \cdot 1)$$

ただし、 $C_i \leq 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$ 、 $K \leq 10^{1.63 \cdot e_{\text{sme}} - 0.24} K_0$ かつ  $K \leq 10^{-5}$

$$K_0 = \begin{cases} (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times e_{\text{sme}}^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} & ..... e_{\text{sme}} \leq 7.0 \\ (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times 7.0^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} \left(\frac{e_{\text{sme}}}{7.0}\right)^{11.4} & ..... 7.0 < e_{\text{sme}} \end{cases}$$

ただし、 $K_0|_{ESP=1} \leq K_0 \leq 10^{-5}$



図補 4.2-1 有効密度の異なるベントナイト試料についての透水試験結果のまとめ<sup>26)</sup>

## 5. RAIDEN 3 の概要

### 5.1 多成分反応移動問題の数学的定式化

液相および固相の化学反応と液相化学種の移動から成る多成分反応移動問題は、一般的には、線形の拡散あるいは移流・分散項と非線形の反応項を含む半線形偏微分方程式として定式化されるが、特に物質移動に比較して十分に速くいわゆる局所瞬時平衡を仮定できるような化学反応については、線形の拡散あるいは移流・分散方程式と非線形代数方程式（質量作用式）とに分離することができる。このような状況においては、各タイムステップにおいてまず線形の物質移動のみを計算することによって、数値解析上の各メッシュ内の基本化学種の総量を算出し、次に、各メッシュ内で化学反応に着目して平衡計算を行うという2ステップ法(operator-splitting法)を用いることができる。また、局所瞬時平衡が成立しないような遅い反応についての速度論的なモデルに対してもこのようなアルゴリズムが適用されている例がある。しかし、2ステップ法において一定の精度を確保するためには、各タイムステップにおける化学反応による濃度変化が小さいことが必要であり、大きな濃度変化を伴うような問題ではタイムステップの大きさを限定することが必要となる場合が多い。

RAIDEN 3<sup>27)</sup>は、

- ・ 遅い反応に関与する溶質の移動についての半線形偏微分方程式
- ・ 速い反応のみに関与する溶質の移動についての線形偏微分方程式と質量作用式の組
- ・ 鉱物の反応に対応する各位置での常微分方程式

を連立することによって得られる連立方程式系を同時に数値的に計算する「直接法」に基づくものである。以下に、RAIDEN 3 で取り扱う多成分反応移動問題の数学的定式化についてまとめる。

まず、多成分系の方程式群をコンパクトに記述するために、次のようなベクトル表記を導入する。

$$u(x,t) = \{u_i(x,t)\}_{i \in I_A} \quad (5.1-1)$$

ただし、 $I_A$  は解析対象とするすべての液相中の基本化学種のセットを示し、 $u_i(x,t)$  は、位置  $x$ 、時刻  $t$  における  $i$  番目の液相中基本化学種の濃度 (mol dm<sup>-3</sup>) を表す。したがって、ベクトル  $u(x,t) = \{u_i(x,t)\}_{i \in I_A}$  は、当該位置および時刻におけるすべての液相基本化学種の状態を記述することとなる。また、同様に、基本化学種の複合形として表現される complex (本来の化学的用語とは異なるが、便宜的に、以下、「錯体」と呼ぶ) についても、

$$c(x, t) = \{c_i(x, t)\}_{i \in I_c} \quad (5.1-2)$$

が定義される。ただし、 $I_C$  は解析対象とするすべての「錯体」のセットとし、また、i番目の「錯体」中のj番目の基本化学種のストイキオメトリーを  $\alpha_{ij}$  と表す。さらに、鉱物（解析対象とするすべての鉱物のセットを  $I_M$  とする）の濃度（mol/m<sup>3</sup>）について、

$$m(x, t) = \{m_i(x, t)\}_{i \in I_M} \quad (5.1-3)$$

とし、また、

$$z(x, t) = \{z_i(x, t)\}_{i \in I_Z} \quad (5.1-4)$$

によって交換性陽イオンの占有割合(%)を表す。なお、鉱物中の基本化学種 i のストイキオメトリーを  $\beta_{ij}$ 、同じく陽イオン交換におけるストイキオメトリーを  $\gamma_{ij}$  とする。

以上のベクトル表記を用いて、反応、移流、そして分散に関する方程式系の全体は次のように定式化される。

$$\frac{\partial}{\partial t}(u_i \theta) = T(i, I_A, u_i, v) - \sum_{j \in I_C} \alpha_{ji} S_j - \sum_{k \in I_M} \frac{\beta_{ki}}{F_M \theta} R_k - \sum_{l \in I_Z} \frac{\gamma_{li}}{F_Z} W_l, \quad i \in I_A, \quad (5.1-5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(c_i \theta) = T(i, I_C, c_i, v) + S_i, \quad i \in I_C, \quad (5.1-6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(m_i) = R_i, \quad i \in I_M, \quad (5.1-7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(z_i) = W_i, \quad i \in I_Z. \quad (5.1-8)$$

ただし、 $R_i(x, t, u(x, t), m(x, t))$  (mol/m<sup>3</sup>/s) および  $S_j(x, t, u(x, t), c(x, t))$  (mol/l/s) は、それぞれ鉱物 i および「錯体」 j の反応に対応する反応項であり、陽イオン交換に対応する反応項を

$W_i(x, t, u(x, t), z(x, t))$  (%/s) とする。また、物質移動に関する微分演算子を形式的に  $T(i, I_P, p_i(x, t), v(x, t))$  と書く。ただし  $i \in I_P$  であり、 $P = A$  の場合には  $p_i = u_i$  であり、また、 $P = C$  の場合には  $p_i = c_i$  である。

なお、 $F_M$  および  $F_Z$  は、鉱物と陽イオン交換の占有率における単位が基本化学種の濃度の単位と異なることを補正するための定数である。

次に、媒体空隙率の変化が、圧縮や膨張といった力学的な現象によらず化学反応に伴う鉱物学的な変化のみによるものであるとすると、次式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta) = - \sum_{j \in I_M} V_j R_j \quad (5.1-9)$$

ここで  $V_j$  は鉱物  $j$  のモル体積である。

既に述べたように、液相中の「錯体」の反応は瞬時平衡を達成するものと仮定されており、このため、(5.1-5)および(5.1-6)式中の  $S_j$  は有限ではなくなる可能性がある。そこで、上記の方程式系を数学的に解法することの可能なものとするために、ベクトル表記である各コンポーネントについて重み付けをした後に加減することにより、すべての  $S_j$  を相殺する。この結果、(5.1-5)～(5.1-8)式は次の様な方程式に書き換えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(u_i \theta) + \sum_{j \in I_C} \alpha_{ji} \frac{\partial}{\partial t}(c_j \theta) + \sum_{k \in I_M} \frac{\beta_{ki}}{F_M \theta} \frac{\partial}{\partial t}(m_k) + \sum_{l \in I_Z} \frac{\gamma_{li}}{F_Z} \frac{\partial}{\partial t}(z_l) \\ = T(i, I_A, u_i, v) + \sum_{k \in I_C} \alpha_{ki} T(k, I_C, c_k, v), \quad i \in I_A \end{aligned} \quad (5.1-10)$$

また、「錯体」は常に瞬時平衡を達成するために、代数方程式である質量作用式

$$\prod_{i \in I_A} \frac{[u_i]^{\alpha_{ji}}}{K_j} = 1, \quad j \in I_C \quad (5.1-11)$$

に置き換えられる。ここで、 $K_j$  は錯体  $j$  の反応に関する平衡定数であり、 $[u_i]$  は、基本化学

種*i*の活量である。

最後に、空隙水の移動に関する支配方程式は次の通りである。

$$S_s \frac{\partial}{\partial t}(h) + \frac{\partial}{\partial t}(\theta) = \frac{\partial}{\partial x} \left( K(x, t, m(x, t), z(x, t)) \frac{\partial}{\partial x}(h) \right) \quad (5.1-12)$$

ただし、 $h = h(x, t)$ は水頭、 $K$ は透水係数、 $S_s$ は次式で定義される比貯留係数であり、 $K$ は一般に鉱物組成およびイオン交換の程度に依存する。

$$S_s = \rho_w g \left( \kappa_M (1 - \theta_0) + \kappa_w \theta + \sum_{i \in I_M} \kappa_i V_i m_i \right), \quad (5.1-13)$$

$\rho_w$ :水の密度、 $\kappa_M$ 、 $\kappa_w$ および $\kappa_i$ 、 $i \in I_M$ はそれぞれ各固相の圧縮係数

### 液相反応

既に述べたように、液相中の反応は瞬時平衡を達成するものと仮定し、したがって質量作用式

$$\prod_{i \in I_A} \frac{[u_i]^{\alpha_j}}{K_j} = 1, \quad j \in I_C \quad (5.1-14)$$

によって反応が記述される。

### 遅い鉱物反応

遅い鉱物反応は、一般的に以下の形式の方程式によって表現される。

$$\frac{\partial}{\partial t}(m_i) = R_i, \quad i \in I_M \quad (5.1-15)$$

また、 $R_i$ は一般に

- 基本化学種濃度 (pH を含む)
- 鉱物濃度
- 反応に寄与する表面積
- 温度

の関数である。

速い鉱物反応

本研究では該当しないが、一般の問題において、ある鉱物  $j$  の溶解・沈殿反応が物質移動に比して十分に速く、したがって瞬時平衡を達成すると仮定すべき場合には、上の微分方程式の代わりに

$$\frac{Q_j}{K_j} = 1, \quad (5.1-16)$$

$$Q_j = \prod_{i \in I_A} [u_i]^{\beta_i}$$

を解くことが必要となる。(5.1-16)式は、平衡多様体と呼ばれ、当該鉱物が存在する間は、常に基本化学種の濃度が解空間の中で対応する部分領域（多様体）上にあることを要求するものである。しかしながら、数値解析上は、(5.1-16)式を厳密に満足することは不可能であり、代わりに平衡エンベロープ条件と呼ぶ次式を用いる。

$$\left| \frac{Q_j}{K_j} - 1 \right| < \varepsilon_j \quad (5.1-17)$$

エンベロープの大きさを表す  $\varepsilon_j$  の値としては、通常、 $10^{-3}$ 程度を用いる。この場合、鉱物が存在し続ける限り、当該反応は常に 99.9% から 100.1% の飽和状態にあることが確保されることとなる。なお、初期条件としては、鉱物反応が非平衡状態から出発する場合も考えられる。このような場合には、系の状態が平衡エンベロープに到達するまで、

$$R_j = k_j \left( \frac{Q_j}{K_j} - 1 \right) \quad (5.1-18)$$

という形式的な反応速度を定義し、 $k_j$  をすべての遅い反応よりも十分に大きな値とすることによって速やかに平衡を回復させる。また、この操作は、基本的にはイオン交換反応を瞬時平衡として取り扱う場合にも同様であるが、上式の代わりに

$$Q_j = \prod_{i \in I_Z} z_i^{\gamma_i} \prod_{k \in I_A} [u_i]^{\gamma_k} \quad (5.1-19)$$

を用いる必要がある。

時間  $t$  に関する  $s$  の微分を  $\dot{s}$  と表現することとすると、全体として次のような形式となる。

$$g(u, c, m, z, \theta, h, \dot{u}, \dot{c}, \dot{m}, \dot{z}, \dot{\theta}, \dot{h}) = f(u, c, m, z, \theta, h) \quad (5.1-20)$$

なお、 $g$  線形の演算子であり、 $f$  は非線形の微分演算子である。

この式は、更に、すべての未知数を

$$\mathbf{u} = u \cup c \cup m \cup z \cup \theta \cup h \quad (5.1-21)$$

として統合すると、簡単に、

$$g(\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}) = f(\mathbf{u}) \quad (5.1-22)$$

と書かれる。最後に、空間差分を行って微分演算子を差分演算子に置き換えることにより、

$$\mathbf{G}(\mathbf{U})\dot{\mathbf{U}} = \mathbf{F}(\mathbf{U}) \quad (5.1-23)$$

が得られる。ここで、 $\mathbf{U}(x_i, t)$  は、 $i$  番目の節点における未知数のベクトルであり、 $\mathbf{G}$  および  $\mathbf{F}$  は差分後の演算子に対応している。

## 5.2 数値解法

前項に述べた連立方程式を数値的に解くために、空間的な離散化を行い物質移動に関する演算子を差分化することにより、偏微分方程式が各メッシュにおける常微分方程式に分解されることとなる。こうして、前項の連立方程式系は、代数方程式と常微分方程式から成る微分代数方程式系 (Differential and Algebraic Equations; DAE) に変換されることとなる。

DAE の数値解の特徴は、係数行列の有する複数の固有値が極端に異なるような所謂「硬い」問題において大きな誤差が生じる場合が多いことである。硬い方程式系は、物理的には、時間スケールの極端に異なるプロセスが同時に進行する状況に対応するものであり、多成分反応移動問題における異種の化学反応や物質移動といった複数のプロセスもその典型例の一つである。

硬いDAEに対する数値解法については 1970 年代から研究が行われており、陰解法の次数とタイムステップの大きさを適宜最適化しながら進むBackward Difference Formula (BDF)と呼ばれる手法が開発されている (Ascher U.M. and Petzold, L.R., 1998)。RAIDEN 3 は、このBDFを用いて多成分反応移動問題に対応するDAEを数値的に解くものである。以下に、RAIDEN 3 におけるDAEの数値解法の概要について述べる。

### 5.2.1 代数微分方程式とそのインデックス

代数微分方程式系 (Differential and Algebraic Equations; DAE) の一般系は次式により与えられる。

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{z}), \\ 0 &= \mathbf{g}(t, \mathbf{x}, \mathbf{z})\end{aligned}\tag{5.2-1}$$

ここで、 $\mathbf{x}(t), \mathbf{z}(t)$  はそれぞれ未知数ベクトルであり、 $\mathbf{f}, \mathbf{g}$  はベクトル値関数である。

(5.2-1)の第一式は、 $\mathbf{x}$  に関する常微分方程式であるが、本来の方程式が位置と時間に関する偏微分方程式である場合（例えば、多成分系の反応・移流・拡散モデル）でも、空間的離散化を行うことにより各節点についての常微分方程式に書き直すことが可能である。また、第二式に対して微分を繰り返すことにより、これを $\mathbf{z}$  に関する微分方程式に書き換えることができ、すなわち、(5.2-1)は連立常微分方程式系に還元される。この際に必要となる微分操作の回数を代数微分方程式系のインデックスという。特に、連立常微分方程式系は、インデックス 0 の代数微分方程式系である。インデックス 2 以上の代数微分方程式系においては、高次微分に伴う「隠れた」制約条件が発生することが知られている。

例)

$$\begin{aligned}y_1 &= q(t), \\y_2 &= y_1'.\end{aligned}$$

は、第一式を微分することによって  $y_2 = y_1' = q'(t)$  となり、さらに微分を繰り返すことにより、

$y_2' = y_1'' = q''(t)$  となる。ここで、初期条件としては、明らかに  $y_1(0) = q(0)$  が成立しなければならない。さらに、「隠れた」制約条件として、 $y_2(0) = q'(0)$  も必要となる。

### 5.2.2 BDF 法

代数微分方程式に含まれる複数の微分方程式が、時間スケールの大きく異なるプロセスに関連している場合、係数行列は特異行列に近いものとなる（固有値の大きさが極端に異なる）。このような問題は、特に「硬い」(stiff)問題と呼ばれている。

硬い代数微分方程式系を解くための標準的な手法は、線形マルチステップ法の一種である BDF (Backward Difference Formulae) 法である。一般に、 $k$  階の線形マルチステップ法では、

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{y}) \quad (5.2-2)$$

の  $t = t_n$  における解  $\mathbf{y}_n$  を得るために、

$$\sum_{j=0}^k \alpha_j \mathbf{y}_{n-j} = h \sum_{j=0}^k \beta_j \mathbf{f}_{n-j} \quad (5.2-3)$$

を解く。但し、 $\alpha_j, \beta_j$  は手法によって異なる定数であり、例えば、最も単純な陰解法である後退オイラー法では、

$$\mathbf{y}_n - \mathbf{y}_{n-1} = h \mathbf{f}(t_n, y_n) \quad (5.2-4)$$

である。これに対して、BDF 法では、

$$\sum_{j=0}^k \alpha_j \mathbf{y}_{n-j} = h \beta_0 \mathbf{f}(t_n, \mathbf{y}_n) \quad (5.2-5)$$

を解くこととなる。6 次までの BDF 法に用いられる係数列を表補 5.2-1 に示す。表から明らかな通り、一階の BDF 法は前出の後退オイラー法に他ならず、換言すれば、BDF 法は後退オイラー法の一般化である。

表補 5.2-1 6 階までの BDF 法に用いる係数列

k	$\beta_0$	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$
1	1	1	-1					
2	2/3	1	-4/3	1/3				
3	6/11	1	-18/11	9/11	-2/11			
4	12/25	1	-48/25	36/25	-16/25	3/25		
5	60/137	1	-300/137	300/137	-200/137	75/137	-12/137	
6	60/147	1	-360/147	450/147	-400/147	225/147	-72/147	10/147

### 5.2.3 改良ニュートンラフソン反復

BDF 法において式(5.2-5)を解くためには、改良ニュートンラフソン反復が用いられる。つまり、

$$\mathbf{y}_n - h\beta_0 \mathbf{f}(t_n, \mathbf{y}_n) = - \sum_{j=1}^k \alpha_j \mathbf{y}_{n-j} \quad (5.2-6)$$

において、右辺は既知であり、 $\nu$  回目の近似結果に基づき次回値を次式により推定することにより解を収束させる。

$$\mathbf{y}_n^{\nu+1} = \mathbf{y}_n^\nu - \left[ I - h\beta_0 \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \right]^{-1} \sum_{j=0}^k \alpha_j \mathbf{y}_{n-j} \quad (5.2-7)$$

但し、 $\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}}$  はヤコビアン行列であり、 $\mathbf{y}_n^\nu$  に基づいて算出される。

上記の操作において最も計算労力を要するのはヤコビアン行列の導出および LU 分解であり、これを低減するために、以下のいずれかに該当する場合にのみヤコビアン行列の再計算を行うようにしたものが改良ニュートンラフソン反復である。

- ・ 近似列が収束しない場合
- ・ タイムステップが大きく変更されるか、あるいは BDF の階数が代わったとき
- ・ 所定のステップ数を経過した場合

近似列は、次の条件を満たした場合に収束したと判断される。

$$\frac{\rho}{1-\rho} |\mathbf{y}_n^{\nu+1} - \mathbf{y}_n^\nu| < NTOL \quad (5.2-8)$$

但し、NTOL は所定の許容誤差であり、 $\rho$  は次式で与えられる収束速度の指標である。

$$\rho = \left( \frac{|\mathbf{y}_n^{\nu+1} - \mathbf{y}_n^\nu|}{|\mathbf{y}_n^1 - \mathbf{y}_n^0|} \right)^{\frac{1}{\nu}} \quad (5.2-9)$$

#### 5.2.4 BDF の階数およびタイムステップの調整

BDF 法は、通常、可変階数、可変タイムステップのアルゴリズムと組み合わせられることによって計算効率が向上される。このためには、まず、 $n$  回目のタイムステップにおける階数が  $k$  である場合に、 $k+1$  階の推定値を近似的に予測し、これら二つの差を局所誤差  $\epsilon$  とする。そして、 $\epsilon < ETOL$ （許容誤差）であればこの計算結果は許容される。そして、次回のタイムステップにおける BDF が  $k \pm i$ ,  $i = 1, 2, \dots$  階であるとすると、それぞれの階数において次回のタイムステップ

の大きさは前回値の  $\left( \frac{\gamma ETOL}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{k \pm i + 1}}$  倍に設定される ( $\gamma < 1$  は所定の定数)。また、階数は、  
 $k \pm i$ ,  $i = 1, 2, \dots$  のうちタイムステップが最大と成るようなものが選ばれる。

## 参考文献

- 1) H. Ueda, H. Hyodo, H. Takase, D. Savage, S.J. Benbow, and M. Noda : "Evaluation of the Kinetics of Cement - Bentonite Interaction in a HLW Repository Using the Reactive Solute Transport Simulator" ICONE 15-10566 . (2007).
- 2) H. Owada, , et al.: Radioactive Waste Management and Environmental Remediation - ASME 1999: Nagoya, Japan (1999).
- 3) T.J. Wolery: "EQ3/6, a software package for geochemical modelling of aqueous systems: Package overview and installation guide (Version 7.0)", UCRL-MA-110662-PTI, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California (1992).
- 4) A.C. Lasaga : "Kinetic theory in the earth sciences", Princeton university press (1998).
- 5) F.J. Huertas, E. Caballero, C. Jimenez de Cisnerous, F. Huertas, and J. Linares : "Kinetics of montmorillonite dissolution in granitic solutions", Applied Geochemistry, Vol.16, pp.397-407 (2001).
- 6) T. Sato, M. Kuroda, S. Yokoyama, M. Tsutsui, K. Fukushi, T. Tanaka, and S. Nakayama : "Dissolution mechanism and kinetics of smectite under alkaline conditions", Proceeding of the International Workshop on Bentonite-Cement Interaction in Repository Environments, NUMO-TR-04-05, pp.A3-38-A3-41 (2004).
- 7) J. Cama, V. Metz,. and J. Ganor : "The effect of pH and temperature on kaolinite dissolution rate under acidic conditions", Geochim. Cosmochim. Acta, Vol.66, pp.3913-3926 (2002).
- 8) J. Cama, J. Ganor, C. Ayora, and C.A. Lasaga : "Smectite dissolution kinetics at 80°C and pH8.8", Geochim. Cosmochim. Acta, Vol.64, pp.2701-2717 (2000).
- 9) Metz, V., Cama, J. and Ganor, J. (2002): Dependence of smectite dissolution rate on deviation from equilibrium, Geochim. Cosmochim. Acta, 66/S1, A509.
- 10) K.L. Nagy, and A.C. Lasaga: "Dissolution and precipitation kinetics of gibbsite at 80°C and pH3: The dependence on solution saturation state", Geochim. Cosmochim. Acta, Vol.56, pp.3093-3111 (1992).
- 11) T.E. Burch, K.L. Nagy and A.C. Lasaga: "Free energy dependence of albite dissolution kinetics at 80°C and pH8.8", Chemical Geology, 105, pp.137-162 (1993).
- 12) S. Carroll, E. Mroczek, M. Alai and M. Ebert: "Amorphous silica precipitation (60 to 120° C): Comparison of laboratory and field rates", Geochimi. Cosmochim. Acta Vol.62, pp.1379-1396 (1998).
- 13) K. L. Nagy, R.T. Cygan, J.M. Hanchar and N.C. Sturchio: "Gibbsite growth kinetics on gibbsite, kaolinite, and muscovite substrates: atomic force microscopy evidence for epitaxy and an assessment of reactive surface area", Geochim. Cosmochim. Acta Vol.63, pp.2337-2351 (1999).
- 14) E.H. Oelkers (2001): "General kinetic description of multioxide silicate mineral and

- glass dissolution”, Geochim. Cosmochim. Acta, Vol.65, pp.3703-3719.
- 15) 原子力環境整備促進・資金管理センター：“放射能レベルの比較的高い低レベル放射性廃棄物を対象とした処分システムの検討調査” 業務委託報告書(2002).
  - 16) 小田治恵, 佐々木良一, D.Savage, R.C.Arthur, 本田明：“緩衝材の鉱物学的長期変遷シリオ”, JNC TN8400 2005-020 (2005).
  - 17) W.E. Dibble and W.A. Tiller: “Kinetic model of zeolite paragenesis in tuffaceous sediments”, Clays and Clay Minerals, Vol.29, pp.323-330 (1981).
  - 18) 井上厚行：“高塩濃度, 高アルカリ環境における粘土鉱物の生成と変化—放射性廃棄物地層処分環境におけるベントナイト緩衝材の変質に関連して”, 粘土科学, 第 43 卷, 第 3 号, pp.145-161 (2004).
  - 19) M.V. Villar and P. Rivas: “Hydraulic properties of montmorillonite-quartz and saponite-quartz mixtures”, Applied Clay Science, Vol.9, pp.1-9 (1994).
  - 20) M. Mihara and R. Sasaki: “RAMDA; Radio-nuclides Migration Datasets(RAMDA) on cement, bentonite and rock for TRU waste repository in Japan”, JNC TN8400 2005-027 (2005).
  - 21) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ一分冊 3 地層処分システムの安全評価”, JNC TN1400 99-023 (1999).
  - 22) H. Kato, M. Muroi, N. Yamada, H. Ishida and H. Sato: “Estimation of effective diffusivity in compacted bentonite”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Scientific Basis for Nuclear Waste Management XVIII, Vol.353, pp.277-284 (1995).
  - 23) 佐藤治夫：“圧縮ベントナイト中の拡散移行経路の異方性に関する基礎的研究”, サイクル機構技報, No.16, JNC TN1340 2002-002, pp.125-136 (2002).
  - 24) 三原守弘, 伊藤勝, 加藤博康, 上田真三：“カルシウム型ベントナイトのトリチウム, セシウム, ヨウ素及び炭素の実効拡散係数の取得(試験報告)”, JNC TN8430 99-011 (1999).
  - 25) 伊藤弘之, 三原守弘：“ベントナイト系材料の飽和透水係数の変遷評価式”, JNC TN8400 2005-029 (2005).
  - 26) 前田宗宏, 棚井憲治, 伊藤勝, 三原守弘, 田中益弘：“カルシウム型化及びカルシウム型ベントナイトの基本特性”, PNC TN8410 98-021 (1998).
  - 27) U.M. Ascher and L.R. Petzold: “Computer Methods for Ordinary Differential Equations and Differential-Algebraic Equations”, Society for Industrial and Applied Mathematics (1998).
  - 28) C. Watson and S. Benbow: “RAIDEN 3 v0.9.5 User Guide”, Quintessa Report QRS-9018-1 (2004).

## 付録 2

### 1. 使用材料の試験成績表

- セメント試験成績表（日鐵セメント）
- エルケムマイクロシリカ検査成績表（エルケムジャパン）
- フライアッシュ試験成績表（北電興業）
- コンクリート用化学混和剤試験結果報告書（エヌエムビー）
- 細骨材試験成績表（幌延砂利工業（イーエス総合研究所））
- 細骨材の表面水率試験（大林組）
- 粗骨材試験成績表（幌延砂利工業（イーエス総合研究所））
- 粗骨材の含水率試験および含水率に基づく表面水率試験（大林組）

### 2. 円板試料の pH 測定

### 3. 弹性波速度測定による HFSC コンクリートの変形特性の試算

## 1. 使用材料の試験成績表

セメント試験成績表

平成18年11月度

種類 品質	普通ポルトランドセメント				早強ポルトランドセメント				高炉セメント B種			
	J I S R 5210 規格値		試験成績		J I S R 5210 規格値		試験成績		J I S R 5211 規格値		試験成績	
	平均値	標準偏差	最大値 (最小値)		平均値	標準偏差	最大値 (最小値)		平均値	標準偏差	最大値 (最小値)	
密度 g/cm <sup>3</sup>	—	3.16	—	—	—	3.14	—	—	—	3.05	—	—
比表面積 cm <sup>2</sup> /g	2500以上	3360	83	—	3300以上	4610	86	—	3000以上	4090	78	—
水量 %	—	27.4	—	—	—	29.4	—	—	—	28.2	—	—
凝結 始発 h-min	60min以上	2-05	—	(1-50)	45min以上	1-45	—	(1-35)	60min以上	2-20	—	(2-10)
終結 h-min	10h以下	3-20	—	3-45	10h以下	3-05	—	3-20	10h以下	3-40	—	4-05
安定性 パット法	良	良	—	—	良	良	—	—	良	良	—	—
圧縮強さ N/mm <sup>2</sup>	1 d	—	—	—	10.0以上	28.9	1.29	—	—	—	—	—
	3 d	12.5以上	30.9	1.67	—	20.0以上	48.9	1.68	—	10.0以上	22.8	1.24
	7 d	22.5以上	46.3	1.81	—	32.5以上	56.0	1.81	—	17.5以上	37.0	1.70
	28 d	42.5以上	61.9	1.93	—	47.5以上	67.1	2.07	—	42.5以上	62.8	1.96
水和熱 J/g	7 d	—	334	—	—	—	—	—	—	—	—	—
化学成分 (%)	28 d	—	388	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	酸化マグネシウム	5.0 以下	1.95	—	2.94	5.0 以下	2.06	—	2.53	6.0 以下	3.65	—
	三酸化硫黄	3.0 以下	2.04	—	2.33	3.5 以下	2.94	—	3.08	4.0 以下	1.95	—
	強熱減量	3.0 以下	1.63	—	2.68	3.0 以下	0.93	—	1.06	3.0 以下	0.48	—
	全アルカリ	0.75以下	0.53	—	0.63	0.75以下	0.47	—	0.50	—	—	—
塩化物イオン	0.035以下	0.012	—	0.020	0.02以下	0.012	—	0.015	—	0.011	—	—
備考												
高炉セメント B種												
ベースセメントの全アルカリ 0.54 %				普通ポルトランドセメント 0.63 %				全アルカリの最大値のうち直近6ヶ月の最大の値				
高炉スラグ混入量 40~45 %				早強ポルトランドセメント 0.50 %								
1. 安定性試験はパット法による。 2. 試験方法はJIS R 5201、JIS R 5202(本体法)、JIS R 5203 及び JIS R 5204による。 3. 28d圧縮強さ及び28d水和熱は、前月度の値を示す。												

## エルケムマイクロシリカ検査成績表

940-U

LOT No.3037260

分析項目	規格値	平均検査値
SiO <sub>2</sub> (%)	90% 以上	95.9
L.O.I (%)	3.0% 以下	0.6
含水率 (%)	1.0% 以下	0.4
かさ密度 (Kg/m <sup>3</sup> )	200 - 350	330
>45 μm (%)	1.5% 以下	0.06

※参考値  
 平均粒径 : 0.15 μm  
 真比重 : 2.2  
 比表面積 : 200,000cm<sup>2</sup>/g

**Test result report of silica fume****Elkem Microsilica Grade 940**

Year: 2006

Month : August

**Elkem AS, Materials**

Item		Quality standard		Test value
		by JIS A 6207		
Silicon Dioxide	%	85 min		97
Magnesium oxide	%	5.0 max		0.6
Sulphur trioxide	%	3.0 max		0.2
Free calcium oxide	%	1.0 max		0.2
Free silicon	%	0.4 max		0.0
Chloride ion	%	0.1 max		0.0
Ignition loss	%	5.0 max		1.3
Humidity (1)	%	3.0 max		1.1
Specific surface area (BET method)	m <sup>2</sup> /g	15 min		19
Density	g/cm <sup>3</sup>	-		-
Pozz. activity index	Material age 7 days	95 min		140
	Material age 28 days	105 min		158

Item	Indication value	Quality standard	Test value
		by JIS A 6207	
Solid content of silica fume		Indication value X 0.96	
slurry (2) %		to Indication value X 1.04	

Notes (1) Applied to powder silica fume and granular silica fume

(2) Applied to silica fume slurry

## フライアッシュ試験成績表

平成 18年 11月度

製造工場 苛東厚真発電所  
 炭種 WA  
 試験方法 JIS A 6201(1999)による

項目	種類	JIS A 6201 による規定値 ※ 該当の種類を○で囲む				試験値
		フライアッシュ I種	フライアッシュ II種	フライアッシュ III種	フライアッシュ IV種	
二酸化けい素 %		45.0 以上	45.0 以上	45.0 以上	45.0 以上	67.7
湿 分 %		1.0 以下	1.0 以下	1.0 以下	1.0 以下	0.05
強熱減量 (1) %		3.0 以下	5.0 以下	8.0 以下	5.0 以下	1.7
密 度 g/cm <sup>3</sup>		1.95 以上	1.95 以上	1.95 以上	1.95 以上	2.20
粉末度	45 μmふるい残分 (3) (網ふるい方法) %	10 以下	40 以下	40 以下	70 以下	17
	比表面積 (ブレーン方法) cm <sup>2</sup> /g	5000 以上	2500 以上	2500 以上	1500 以上	4,070
フロー値比 %		105 以上	95 以上	85 以上	75 以上	110
活性度指数 (%)	材齢28日	90 以上	80 以上	80 以上	60 以上	81
	材齢91日	100 以上	90 以上	90 以上	70 以上	90

注 (1) 未燃炭素測定による場合は、その試験値に(炭素)と付記する。

(2) 粉末度は、網ふるい方法又はブレーン方法による。

(3) 粉末度を網ふるい方法による場合は、ブレーン方法による比表面積の試験結果を参考値として併記する。

備考 材齢28日および91日の活性度指数は、それぞれ前月および前3ヶ月度の値を示す。

## 平成18年10月度～18年12月度 コンクリート用化学混和剤(JIS A 6204)試験結果報告書

品名 ニッペル SP8SV  
種類 高性能AE減水剤 標準形(I種)

## 1. コンクリートの試験結果

項目		JIS A 6204による規定値	形式評価試験値	通常管理試験値
フレッシュコンクリート	減水率 %	18 以上	18	18
	ブリーディング量の比 %	60 以下	39	—
	ブリーディング量の差 cm/cm	— 以下	—	—
	凝結時間の差分	始発 -60 ~ +90 終結 -60 ~ +90	+60 +50	+65 +60
経時変化量	スランプ cm	6.0 以下	1.5	2.5
	空気量 %	± 1.5 以内	+0.5	-0.1
硬化コンクリート	圧縮強度比 %	材齢1日 一 以上 材齢2日(5℃) 一 以上 材齢7日 125 以上 材齢28日 115 以上	— — 145 133	— — 146 134
	長さ変化比 %	110 以下	97	—
	凍結融解に対する抵抗性 (相対動弾性係数 %)	60 以上	96	—

備考1. 1 m<sup>3</sup>当たりの化学混和剤の使用量 形式評価試験 3.15 kg/m<sup>3</sup>, 通常管理試験 3.15 kg/m<sup>3</sup>

備考2. 通常管理試験は3か月ごとに年4回実施し、この表に書かれている試験値は、平成18年08月の試験結果である。ただし圧縮強度の通常管理試験は年1回実施し、この表に表示されている試験値は、平成18年05月の試験結果である。

備考3. この表に書かれている形式評価試験は、平成17年06月に㈱エヌエムピー中央研究所で実施した試験結果である。

2. 塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>)量及び全アルカリ量

項目	JIS A 6204による規定値	形式評価試験値	通常管理試験		
			化学混和剤中の含有量	混和剤当たりの化学混和剤の使用量	試験値
塩化物イオン(Cl <sup>-</sup> )量	0.02 kg/m <sup>3</sup> 以下	0.00 kg/m <sup>3</sup>	0.01 %	3.15 kg/m <sup>3</sup>	0.00 kg/m <sup>3</sup>
全アルカリ量	0.30kg/m <sup>3</sup> 以下	0.04 kg/m <sup>3</sup>	1.4 %	3.15 kg/m <sup>3</sup>	0.04 kg/m <sup>3</sup>

備考1. 通常管理試験は3か月ごとに年4回実施し、この表に書かれている試験値は、平成18年08月の試験結果である。

備考2. この表に書かれている形式評価試験は、平成17年06月に㈱エヌエムピー中央研究所で実施した試験結果である。

## 3. その他の項目

項目	規格値	試験値
密度 (g/cm <sup>3</sup> , 20℃)	1.040 ~ 1.110	1.065

備考 この表に表示されている試験値は、平成18年08月の試験結果である。

注) セメント質量に対する化学混和剤使用量 CX0.90%

## 骨材試験成績一覧表

依頼者 島延砂利工業株  
 試料名 砂  
 产地 天塩郡幌延町字浜里159番地1他  
 用途 コンクリート用  
 報告年月日 平成18年4月21日

細骨材						粗骨材																																																					
ふるい目の開き	各ふるいに通る量の割合			各ふるいに通る量の割合			ふるい目の開き	各ふるいに通る量の割合			各ふるいに通る量の割合																																																
	質量	百分率	質量	百分率	質量	百分率		質量	百分率	質量	百分率																																																
mm	g	%	g	%	g	%	mm	g	%	g	%																																																
9.5~4.75	0.0	0	0.0	0	100	106	~75																																																				
4.75~2.36	80.4	14	80.4	14	86	75	~63																																																				
2.36~1.18	179.1	31	98.7	17	69	63	~53																																																				
1.18~0.6	321.4	56	142.3	25	44	53	~37.5																																																				
0.6~0.3	473.2	83	151.8	27	17	37.5	~31.5																																																				
0.3~0.15	537.3	94	64.1	11	6	31.5	~26.5																																																				
受皿	572.8	100	35.5	6	0	26.5	~19																																																				
合計			572.8	100		19	~16																																																				
粗粒率	2.78					16	~9.5																																																				
試験項目	単位	細骨材	粗骨材	9.5~4.75																																																							
単位容積質量	kg/l	1.767		4.75~2.36																																																							
絶乾密度	g/cm³	2.63		2.36~1.18																																																							
吸水率	%	1.13		1.18~0.6																																																							
微粒分量	%	0.65		0.6~0.3																																																							
すりへり減量	%	—		0.3~0.15																																																							
骨材の安定性	%	3.5		受皿																																																							
有機不純物	—	淡い	—	合計																																																							
圧縮強度	N/cm²	—		粗粒率																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">細骨材</th> <th colspan="6">粗骨材</th> </tr> <tr> <th>通</th> <th>過</th> <th>質</th> <th>量</th> <th>百</th> <th>分</th> <th>率</th> <th>(%)</th> <th>通</th> <th>過</th> <th>質</th> <th>量</th> </tr> <tr> <th>75</th> <th>150</th> <th>300</th> <th>400</th> <th>500</th> <th>1.18</th> <th>2.0</th> <th>2.36</th> <th>4.75</th> <th>9.5</th> <th>13.2</th> <th>16</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> </tr> </tbody></table>												細骨材						粗骨材						通	過	質	量	百	分	率	(%)	通	過	質	量	75	150	300	400	500	1.18	2.0	2.36	4.75	9.5	13.2	16												
細骨材						粗骨材																																																					
通	過	質	量	百	分	率	(%)	通	過	質	量																																																
75	150	300	400	500	1.18	2.0	2.36	4.75	9.5	13.2	16																																																
塩分量	%	0.0086																																																									
密度1.95に浮く粒子	%	0.0																																																									
粘土塊量	%	0.00																																																									
軟石量	%	—																																																									

JIS A 1104	骨材の単位容積質量及び実積率試験		
依頼者 島延砂利工業㈱			
試料名 砂	試験者		
採取地	試験場所		
採取者	試験年月日 平成18年4月8日		
採取年月日	最大寸法(mm)		
骨材の表乾密度① 2.66	骨材の吸水率(%)② 1.13		
試験室の状態	室温(℃) 21	湿度(%) 51	水温(℃) 19
			乾燥温度(℃) 110
試料の状態	絶乾状態	棒突き法	含水率測定 <sup>(1)</sup> 無
記事			
測定番号	1	2	1
③ 容器の容積(l)	2	2	
④ 容器の質量(kg)	1.070	1.070	
⑤ (試料+容器)の質量(kg)	4.610	4.597	
⑥ 試料質量⑤ - ④(kg)	3.540	3.527	
⑦ 含水率測定のための乾燥前の試料の質量(g)			
⑧ ⑦の乾燥後の試料の質量(g)			
⑨ 単位容積質量 <sup>(6)</sup> ③ または <sup>(6)</sup> ③ × <sup>(8)</sup> ⑦ (kg/l)	1.770	1.764	
⑩ 平均値(kg/l)	1.767		
⑪ 平均値からの差 <sup>(2)</sup> (kg/l)	0.00		
⑫ 実積率 <sup>(9) × 100 + ②</sup> ① (%)	67.3	67.1	
⑬ 平均値(%)	67.2		
⑭ 平均値からの差	0.10		

注(1) 絶乾状態の試料を用いる場合又は試料の含水率が1.0%以下の見込みの場合は、含水率の測定は省略してよい。

(2) 試験は2回行い、その精度は、平均値からの差が0.01kg/l以下でなければならない。

備考:

JIS A 1109	細骨材の密度及び吸水率試験	
------------	---------------	--

依頼者 帆延砂利工業株

試料名 砂 試験者

採取地 試験場所

採取者 試験年月日 平成18年4月10日

採取年月日 ピクノメータ容積 500 cc

試験室の状態	室温(℃)	乾燥温度(℃)	検定水の温度(℃)	水の密度( $\rho_w$ )
	19	110	20	0.9982

記事				
----	--	--	--	--

測定番号	1	2	1	2
① ピクノメーターの番号				
② (ピクノメーター+検定水)の質量(g)	677.8	675.4		
③ 試料の質量(g)	500.0	500.0		
④ (ピクノメーター)+(水)+(試料)の質量(g)	990.4	987.6		
⑤ 表乾密度 = $\frac{③ \times \rho_w}{② + ③ - ④}$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.663	2.658		
⑥ 平均値(g/cm <sup>3</sup> )	2.66			
⑦ 平均値からの差(g/cm <sup>3</sup> )	0.00			
⑧ 試料の質量(g)	500.0	500.0		
⑨ 乾燥後の試料の質量(g)	494.5	494.3		
⑩ 吸水率 = $\frac{⑧ - ⑨}{⑨} \times 100$ (%)	1.11	1.15		
⑪ 平均値(%)	1.13			
⑫ 平均値からの差(%)	0.02			

注 (1) 試験は2回行い、その精度は平均値からの差が密度試験の場合0.01以下、吸水率試験の場合0.05%以下でなければならない。  
備考 :

絶乾密度 = $\frac{⑤}{(1 + 0.01 \times ⑩)} (g/cm^3)$	2.634	2.628		
平均値(g/cm <sup>3</sup> )	2.63			
平均値からの差(g/cm <sup>3</sup> )	0.00			

JIS A 1103	骨材の微粒分量試験			
依頼者	幌延砂利工業株			
試料名	砂	試験者		
採取地		試験場所		
採取者		試験年月日	平成18年4月6日	
採取年月日		最大寸法(㎜)		
試験室の状態	室温(℃)	湿度(%)	水温(℃)	
	22	55	19	
記事				
測定番号	1	2	1	2
①洗う前の乾燥質量(g)	500.0	500.0		
②洗った後の乾燥質量(g)	496.6	496.9		
③0.075mmふるいを通過する量の百分率(%) $\frac{①-②}{①} \times 100$	0.68	0.62		
④平均値(%)	0.65			
⑤測定値の差 <sup>(1)</sup> (%)	0.06			

注(1)測定値の差は、細骨材の場合0.5%以下、粗骨材の場合0.3%以下でなければならない。

備考:

JIS A 1122	硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験	
------------	--------------------	--

依頼者 幌延砂利工業株

試料名 砂 試験者

採取地 試験場所

採取者 試験年月日 平成18年 4月 19日

採取年月日 最大寸法(mm)

試験日の状態	室温(℃)	湿度(%)	水温(℃)	乾燥温度(℃)
	23	56	21	110

記事	
通るふるい (mm)	とどまるふ るい (mm)

通るふるい (mm)	とどまるふ るい (mm)	①各群の質 量百分率 (%)	②試験前 の各群の質 量 (g)	③試験後 の各群の質 量 (g)	④各群の損失質 量百分率 $(1 - \frac{\text{③}}{\text{②}}) \times 100$ (%)	骨材の損失 質量百分率 $\frac{\text{①} \times \text{④}}{100}$ (%)
—	—	—	—	—	—	—

## 細骨材の安定性試験

0.3	—	18.9	—	—	—	—
0.6	0.3	24.9	100.0	95.9	4.1	1.0
1.2	0.6	26.3	100.0	95.3	4.7	1.2
2.5	1.2	15.3	100.0	95.4	4.6	0.7
5.0	2.5	14.6	100.0	96.1	3.9	0.6
10.0	5.0	0.0	—	—	—	—
合計		100.0				3.5

## 粗骨材の安定性試験

10.0	5.0	—	—	—	—	—
15.0	10.0	—	—	—	—	—
20.0	15.0	—	—	—	—	—
25.0	20.0	—	—	—	—	—
40.0	25.0	—	—	—	—	—
60.0	40.0	—	—	—	—	—
80.0	60.0	—	—	—	—	—
合計		—				

観察 (20mm以上の粒)	試験前個数(個) 異常を認めた個数(個)	—	破壊状況	—
判定	細骨材 合格	粗骨材	—	—

注(1) 全質量の5%に満たない群のものについては、試験をしないが、その群の前後における損失質量百分率の平均値をもってその群の値とする。前後の群における試験値のいずれかが欠けているときは、欠けていない方の群の損失質量百分率をとる。

JIS A 1105	細骨材の有機不純物試験	
------------	-------------	--

依頼者 帳延砂利工業株

試料名 砂 試験者

採取地 試験場所

採取者 試験年月日 平成18年4月15日

採取年月日 最大寸法(mm)

試験日の状態	室温(℃)	湿度(%)	水温(℃)	乾燥温度(℃)
	20	51	18	110

記事	測定番号	1	2	1	2
静置開始時刻					
判定時刻					
標準色液との比較結果		淡い	淡い		
試験溶液の色 <sup>(1)</sup>		②	②		
判定	定	合格			

注(1) 試験溶液の色は下記の番号による。

- ① 無色ないし淡黄色 ② 淡黄色 ③ 赤黄色 ④ 淡赤褐色 ⑤ 暗赤褐色

備考:

JIS A 5002	細骨材中の塩化物量試験	
------------	-------------	--

調査名・目的 嘉延砂利工業(株)

試料名 砂	試験者
採取地	試験場所
採取者	試験年月日 平成18年4月11日
採取年月日	

測定番号	1	2
①容器(広口瓶)の質量(g)	360.5	360.5
②(容器+試料)の質量(g)	1349.3	1349.3
③試料(絶乾)の質量②-①(g)	988.8	988.8
④アラク試験滴定量(0.1mol/l-AgNO <sub>3</sub> )(ml)	0.50	1.90
⑤本試験滴定量(0.1mol/l-AgNO <sub>3</sub> )(ml)	1.90	3.40
⑥ファクター	1.000	
⑦塩化物量(NaClとして) $\frac{0.00584 \times (⑤ - ④) \times 10 \times ⑥}{③} \times 100$ (%)	0.0083	0.0089
⑧平均値 (%)	0.0086	
⑨判定	合格	
規格値 (%)	0.04以下	

備考:

参考資料 : レディミクストコンクリート用骨材における規定は下記の通りである。

◎土木用骨材: 細骨材に含まれる塩分の許容限度は、原則として細骨材の  
絶乾質量に対しNaClに換算して0.1%以下とする。

◎建築用骨材: 0.04%以下。  
0.04%を超すものについては購入者の承認を得るものとする。  
ただし、その限度は原則として0.1%とする。

JIS A 1141	骨材中の密度1.95g/cm <sup>3</sup> の液体に浮く粒子の試験	
------------	---	--

依頼者 島延砂利工業(株)

試料名 砂 試験者

採取地 試験場所

採取者 試験年月日 平成18年4月21日

採取年月日 最大寸法(mm)

試験日の状態	室温(℃)	湿度(%)	水温(℃)	乾燥温度(℃)
	21	49	20	110

記事				
細骨材の浮粒試験	1	2	1	2

① 0.6mm以上の試料乾燥質量(g)	178.0	169.8		
② こし網に残った粒子の乾燥質量(g)	0.0	0.0		
③ 軽い粒子の百分率 $\frac{②}{①} \times 100$ (%)	0.0	0.0		
④ 平均(%)	0.0			
⑤ 判定	合格			

備考:

粗骨材の浮粒試験	1	2	1	2
① 5mm以上の試料乾燥質量(g)				
② こし網に残った粒子の乾燥質量(g)				
③ 軽い粒子の百分率 $\frac{②}{①} \times 100$ (%)				
④ 平均(%)				
⑤ 判定				

備考:

JIS A 1137	骨材中に含まれる粘土塊量の試験
------------	-----------------

依頼者 島延砂利工業株

試料名 砂 試験者

採取地 試験場所

採取者 試験年月日 平成18年4月8日

採取年月日 最大寸法(mm)

試験室の状態	室温(℃)	湿度(%)	水温(℃)	乾燥温度(℃)
	21	50	19	110
記事				

## 細骨材の粘土塊量試験

測定番号	1	2	1	2
① 試験前の試料の乾燥質量(g)	298.1			
② 試験後の試料の乾燥質量(g)	298.1			
③ 損失質量 ① - ② (g)	0.0			
④ 粘土塊量 ③×100 (%)	0.00			
⑤ 平均値 (%)				
⑥ 平均値からの差 (%)				
判定	合格			

## 粗骨材の粘土塊量試験

測定番号	1	2	1	2
⑦ 試験前の試料の乾燥質量(g)				
⑧ 試験後の試料の乾燥質量(g)				
⑨ 損失質量 ⑦ - ⑧ (g)				
⑩ 粘土塊量 ⑨×100 (%)				
⑪ 平均値 (%)				
⑫ 平均値からの差 (%)				
判定				

平成 18年05月11日

**骨材のアルカリシリカ反応性試験（化学法）**

依頼者 峴延砂利工業(株)

試験法 JIS A 1145

骨材产地 天塩郡峠延町字浜里159番地1他

骨材種別 砂

試験年月日 平成 18年05月10日

試験溶液(希釈)の量 V1(ml)		20	塩酸規定度	0.05	規定液のファクター	1.003
塩酸滴定	No		1	2	3	B L
	(1) 最初の読み		0.00	0.00	0.00	0.00
	(2) 限界点の読み	V <sub>2</sub> =18.28	V <sub>2</sub> =18.29	V <sub>2</sub> =18.31	V <sub>3</sub> =19.80	
	塩酸滴定量(1)-(2) (ml)	18.28	18.29	18.31	19.80	
アルカリ濃度減少量 Rc=20N(V <sub>3</sub> -V <sub>2</sub> )*1000*F/V <sub>1</sub> (mmol/l)		76	76	75		
平均値			76			
質量法	No	1	2	3		
	試験溶液の分取量 (ml)	5	5	5		
	(3) 溶解 SiO <sub>2</sub> +るつぼの重量 (g)	19.2415	20.2998	19.2324		
	(4)るつぼの重量 (g)	19.2226	20.2809	19.2135		
	SiO <sub>2</sub> の重量 (W) (3)-(4) (g)	0.0189	0.0189	0.0189		
	溶解シリカ量 Sc=3330×(W) (mmol/l)	63	63	63		
	平均値		63			
判定		無	害			

## 備考

## 判定方法

Scが10mm以上で、Rcが700mmol未満の時、ScがRc以上となる場合、無害でないものと判定し、それ以外を無害とする。

[試験名] 細骨材の表面水率試験 (JIS A 1111-2001)					
試験日	平成18年11月26日 天候				
試験日の状態	室温(℃)	湿度(%)	水温(℃)		
	20.0				
試 料	砂(幌延町浜里産)				
測定番号	1	2	3	4	
① フラスコの番号	1	2	3	4	
② フラスコ+水の質量 (g)	1009.2				
③ 試料の質量 (g)	500.0				
④ (フラスコ)+(水)+(試料) の質量 (g)	1317.3				
⑤ $m = ② + ③ - ④$	191.9				
⑥ 密度	2.66				
⑦ $m_s = ③ / ⑥$	188.0				
⑧ 表面水率(%)					
(⑤-⑦) / (③-⑤) × 100	1.28				
⑨ 許容差	平均値からの差が0.3%以下				
⑩ 平均値					
⑪ 試料を覆う水量(ml)					
⑫ 試料+水の容積(ml)					
⑬ $V = ⑫ - ⑪$ (g)					
⑭ 表面水率(%)					
(⑬-⑦) / (③-⑬) × 100					
⑮ 許容差	平均値からの差が0.3%以下				
⑯ 平均値					
備考					

## 骨材試験成績一覧表

依頼者 幌延砂利工業㈱

試料名 15~5mm砂利

産地 天塩郡幌延町字浜里159番地1他

総括責任者

用途 コンクリート用

報告年月日 平成18年4月21日

試験責任者

細骨材						粗骨材															
ふるい目の開き mm	各あるいの累計 質量			各あるいの累計 質量			各あるいの累計 質量			各あるいの累計 質量											
	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%									
9.5 ~4.75							106 ~75														
4.75~2.36							75 ~63														
2.36~1.18							63 ~53														
1.18~0.6							53 ~37.5														
0.6 ~0.3							37.5~31.5														
0.3 ~0.15							31.5~26.5														
受皿							26.5~19														
合計							19 ~16	0	0	0	0	100									
粗粒率							16 ~9.5	1772	29	1772	29	71									
試験項目	単位	細骨材	粗骨材	9.5 ~4.75			4182	68	2410	39	32										
単位容積質量	kg/l			1.734	4.75~2.36		6165	100	1983	32	0										
絶乾密度	g/cm <sup>3</sup>			2.66	2.36~1.18		6165	100	0	0	0										
吸水率	%			0.61	1.18~0.6		"	"	"	"	"										
微粒分量	%			0.24	0.6 ~0.3		"	"	"	"	"										
すりへり減量	%			8.1	0.3 ~0.15		"	"	"	"	"										
骨材の安定性	%			3.0	受皿		6165	100	0	0	0										
有機不純物	-				合計				6165	100											
圧縮強度	N/cm <sup>2</sup>			-	粗粒率		5.97														
通過質量百分率 (%)	細骨材						粗骨材														
100																					
90																					
80																					
70																					
60																					
50																					
40																					
30																					
20																					
10																					
0																					
	75	150	300	400	500	1.18	2.0	2.36	4.75	9.5	18.2	26.5	31.5	37.5	53	63	75	90	100	150	
						ふるい目の開き (μm)				ふるい目の開き (mm)											

塩分量	単位	細骨材	粗骨材
密度1.95に浮く粒子	%	0.0	
粘土塊量	%	-	
軟石量	%	-	

株式会社 イ一工ス総合研究所

JIS A 1104	骨材の単位容積質量及び実積率試験	
------------	------------------	--

依頼者 帆延砂利工業(株)

試料名	15~5mm砂利	試験者	
採取地		試験場所	
採取者		試験年月日	平成18年4月8日
採取年月日		最大寸法(mm)	
骨材の表乾密度①	2.66	骨材の吸水率(%)②	0.61

試験室の状態	室温(℃)	湿度(%)	水温(℃)	乾燥温度(℃)
	21	51	19	110
試料の状態	絶乾状態	棒突き法	含水率測定 <sup>(1)</sup>	無
記事				
測定番号	1	2	1	2
③ 容器の容積(l)	10.00	10.00		
④ 容器の質量(kg)	3.737	3.737		
⑤ (試料+容器)の質量(kg)	21.098	21.069		
⑥ 試料質量⑤-④(kg)	17.361	17.332		
⑦ 含水率測定のための乾燥前の試料の質量(g)				
⑧ ⑦の乾燥後の試料の質量(g)				
⑨ 単位容積質量⑥または⑥×⑧⑦(kg/l)	1.736	1.733		
⑩ 平均値(kg/l)	1.734			
⑪ 平均値からの差 <sup>(2)</sup> (kg/l)	0.00			
⑫ 実積率⑨× $\frac{100+②}{①}$ (%)	65.7	65.5		
⑬ 平均値(%)	65.6			
⑭ 平均値からの差	0.10			

注(1) 絶乾状態の試料を用いる場合又は試料の含水率が1.0%以下の見込みの場合は、含水率の測定は省略してよい。

(2) 試験は2回行い、その精度は、平均値からの差が0.01kg/l以下でなければならない。

備考:

JIS A 1110	粗骨材の密度及び吸水率試験	
------------	---------------	--

調査名・目的 島原砂利工業株

試料名 15~5mm砂利 試験者

採取地 試験場所

採取者 試験年月日 平成18年4月10日

採取年月日 最大寸法(mm)

試験室の状態	室温(℃)	乾燥温度(℃)	検定水の温度(℃)	水の密度( $\rho_w$ )
	19	110	20	0.9982

記事				

測定番号	1	2	1	2
① 空気中の試料の質量(g)	1701.2	1698.3		
② かごと試料の水中質量(g)	1517.7	1516.8		
③ かごの水中質量(g)	450.8	450.8		
④ 試料の水中質量(g)	1066.9	1066.0		
⑤ 表乾密度 = $\frac{① \times \rho_w}{① - ④}$ (g/cm³)	2.677	2.681		
⑥ 平均値 (g/cm³)	2.68			
⑦ 平均値からの差 (g/cm³)	0.00			
⑧ 乾燥後の試料の質量(g)	1690.7	1688.3		
⑨ 吸水率 = $\frac{① - ⑧}{⑧} \times 100$ (%)	0.62	0.59		
⑩ 平均値 (%)	0.61			
⑪ 平均値からの差 (%)	0.02			

注(I) 試験は2回を行い、その精度は平均値からの偏差が密度試験の場合0.01g/cm³以下、吸水率試験の場合0.03%以下でなければならない。

備考:

絶乾密度 = $\frac{⑧ \times \rho_w}{① - ④}$ (g/cm³)	2.661	2.665		
平均値 (g/cm³)	2.66			
平均値からの差 (g/cm³)	0.00			

JIS A 1103	骨材の微粒分量試験			
依頼者	幌延砂利工業株			
試料名	15~5mm砂利	試験者		
採取地				試験場所
採取者				試験年月日 平成18年4月6日
採取年月日				最大寸法 (mm)
試験室の状態	室温 (°C)	湿度 (%)	水温 (°C)	
	22	55	19	
記事				
測定番号	1	2	1	2
① 洗う前の乾燥質量 (g)	1522.6	1602.2		
② 洗った後の乾燥質量 (g)	1519.4	1598.0		
③ 0.075mmふるいを通過する量の百分率 (%) $\frac{①-②}{①} \times 100$	0.21	0.26		
④ 平均値 (%)	0.24			
⑤ 測定値の差 <sup>(a)</sup> (%)	0.05			

注(1) 測定値の差は、細骨材の場合0.5%以下、粗骨材の場合0.3%以下でなければならない。

備考:

JIS A 1121	ロサンゼルス試験機による粗骨材のすりへり試験			
調査名・目的 帳延砂利工業株				
試料名	15~5mm砂利			
採取地				
採取者				
採取年月日	試験年月日 平成18年4月13日			
最大寸法(mm)	玉の数(個) 8			
粒度区分	回転速度(回/分) 33			
C	回転数(回) 500			
	鋼球質量 3330			
試験日の状態	室温(℃)	湿度(%)	水温(℃)	乾燥温度(℃)
	23	56	20	110
記事				
ふるい分け試験			試験前の試料の質量(g)	
とどまるふるい(mm)	通るふるい(mm)	各群の質量百分率(%)		
2.5	2.5			
2.5	5			
5	10		2502	
10	15		2507	
15	20			
20	25			
25	40			
40	50			
50	60			
60	80			
合計			①	5009
② 試験後1.7mmふるいに残った試料の乾燥質量(g)			4605	
③ すりへり損失質量 ① - ②(g)			404	
④ すりへり減量 $\frac{③}{①} \times 100$ (%)			8.1	
備考:				

JIS A 1122	硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験					
依頼者 幌延砂利工業株						
試料名	15~5mm砂利		試験者			
採取地			試験場所			
採取者			試験年月日	平成 18年 4月 19日		
採取年月日			最大寸法(mm)			
試験日の状態	室温(℃)		湿度(%)	水温(℃)	乾燥温度(℃)	
	23		56	21	110	
記事						
通るふるい (mm)	とどまるふ るい (mm)	①各群の質 量百分率 (%)	②試験前の 各群の質量 (g)	③試験後の 各群の質量 (g)	④各群の損失質量百分率 $(1 - \frac{③}{②}) \times 100$ (%)	骨材の損失 質量百分率 $\frac{① \times ④}{100}$ (%)
細骨材の安定性試験						
0.3	—	0.0	—	—	—	—
0.6	0.3	0.0	—	—	—	—
1.2	0.6	0.0	—	—	—	—
2.5	1.2	0.0	—	—	—	—
5.0	2.5	0.0	—	—	—	—
合計	—					—
粗骨材の安定性試験						
10.0	5.0	57.7	304.0	295.0	2.9	1.6
15.0	10.0	42.3	504.0	486.1	3.5	1.4
20.0	15.0	0.0	—	—	—	—
25.0	20.0	—	—	—	—	—
40.0	25.0	—	—	—	—	—
60.0	40.0	—	—	—	—	—
80.0	60.0	—	—	—	—	—
合計	—	100.0	—	—	—	3.0
観察 (20mm以上の粒)	試験前個数(個)		—	破壊状況	—	
	異常を認めた個数(個)		—		—	
判定	細骨材			粗骨材		
	—			合格		

注(1) 全質量の5%に満たない群のものについては、試験をしないが、その群の前後における損失質量百分率の平均値をもってその群の値とする。前後の群における試験値のいずれかが欠けているときは、欠けていない方の群の損失質量百分率をとる。

JIS A 1141	骨材中の密度1.95g/cm <sup>3</sup> の液体に浮く粒子の試験	
------------	---	--

調査名・目的 島延砂利工業(株)

試料名 15~5mm砂利 試験者

採取地 試験場所

採取者 試験年月日 平成18年4月21日

採取年月日 最大寸法(mm)

試験日の状態	室温(℃)	湿度(%)	水温(℃)	乾燥温度(℃)
	21	49	20	110

記事	1	2	1	2

細骨材の浮粒試験	1	2	1	2
① 0.6mm以上の試料乾燥質量(g)				
② こし網に残った粒子の乾燥質量(g)				
③ 軽い粒子の百分率 $\frac{②}{①} \times 100$ (%)				
④ 平均 (%)				
⑤ 判定				

備考:

粗骨材の浮粒試験	1	2	1	2
① 5mm以上の試料乾燥質量(g)	2505.6	2541.2		
② こし網に残った粒子の乾燥質量(g)	0.0	0.0		
③ 軽い粒子の百分率 $\frac{②}{①} \times 100$ (%)	0.0	0.0		
④ 平均 (%)	0.0			
⑤ 判定	合格			

備考:

## [実験名] 骨材の含水率試験および含水率に基づく表面水率試験 (JIS A 1125-2001)

## 2. 円板試料の pH 測定

件名

円板 HFSC 平衡水の pH 測定

試料名

①HFSC523

②HFSC 吹き付け いずれも幌延関連試験の中の円板状ペースト硬化体

試験項目・方法

- ・試料養生 : 支給頂いた  $\phi 5 \times 10\text{cm}$  試験体を 28 日の密封養生後、上下端面を切除し厚さ約 2cm の円板状にスライスし、少量のイオン交換水中で水中養生。
- ・試料調製 : 材齢 364 日となった試料を 1cm 以下程度に粗碎、真空乾燥した。乾燥後の試料を 0.5mm 以下に微粉碎した。
- ・浸漬 : 粉碎した試料を 2 倍重量のイオン交換水に浸漬。
- ・pH 測定 : 浸漬翌日にガラス電極法で pH を測定。

試験結果

試験結果を表付 2-1 に示す。

表付 2-1 各試料の蛍光 X 線分析結果

試料	pH 測定結果
HFSC523	12.15
HFSC 吹き付け	11.86

### 3. 弹性波速度測定による HFSC コンクリートの変形特性の試算

幌延で想定している吹付け配合のベースコンクリート供試体の弾性波速度測定は、以下の仕様で実施した。なお、コンクリートの試験方法は特に規定が無いので、岩盤で実施する方法に準拠した。

#### 試験条件

- ・コンクリートは 56 日材齢で実施
- ・供試体は吹付け前のベースコンクリートで作成したもので、形状は  $\phi 10\text{cm} \times h20\text{cm}$  で 3 本
- ・水中養生している供試体を測定直前に取出し後、直径と高さを測定
- ・p, s 弹性波速度は表乾状態で測定し、測定方向は供試体の長手方向
- ・静弾性係数と静ポアソン比は、その後に行う圧縮強度試験時にゲージを貼り付けて測定
- ・ゲージをクロスゲージ×3 段×3 体=18 枚に貼る
- ・圧縮強度試験時には、端面のグリースを塗り、外部変形を測定する

#### 試験結果

試験結果を表付 3-1 と図付 3-1 に示す。

**弾性波速度から変形特性の推定**  
・換算式により動ポアソン比と動弾性係数を算定した。

**弾性波速度の測定精度**  
・異なる計測器で測定したP波速度は誤差5%程度で測定され、以下マリイ製の計器の値を用いる。

## ・弾性波速度試験

No	ULTRA SONI SCOPE (マリイ製)						パンジット(富士物産製)	
	P波速度		S波速度		動ポアソン比 $\nu$	動弾性係数 $E$ (kN/mm <sup>2</sup> )	P波速度	
	伝播時間 tp (μ sec)	Vp (km/sec)	伝播時間 ts (μ sec)	Vs (km/sec)			伝播時間 tp (μ sec)	Vp (km/sec)
1	44.6	4.466	74.6	2.670	0.22	40.1	42.6	4.676
2	44.0	4.482	74.0	2.665	0.23	40.2	42.6	4.629
3	43.3	4.557	72.0	2.740	0.22	42.1	42.2	4.675

## ・圧縮強度試験

No	質量 (kg)	直径 (mm)	高さ (mm)	見かけの密度 (kg/m <sup>3</sup> )	最大荷重 (kN)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
1	3.605	100.0	199.2	2304	491.6	62.5
2	3.578	100.0	197.2	2310	494.0	62.7
3	3.576	100.1	197.3	2303	470.4	59.6

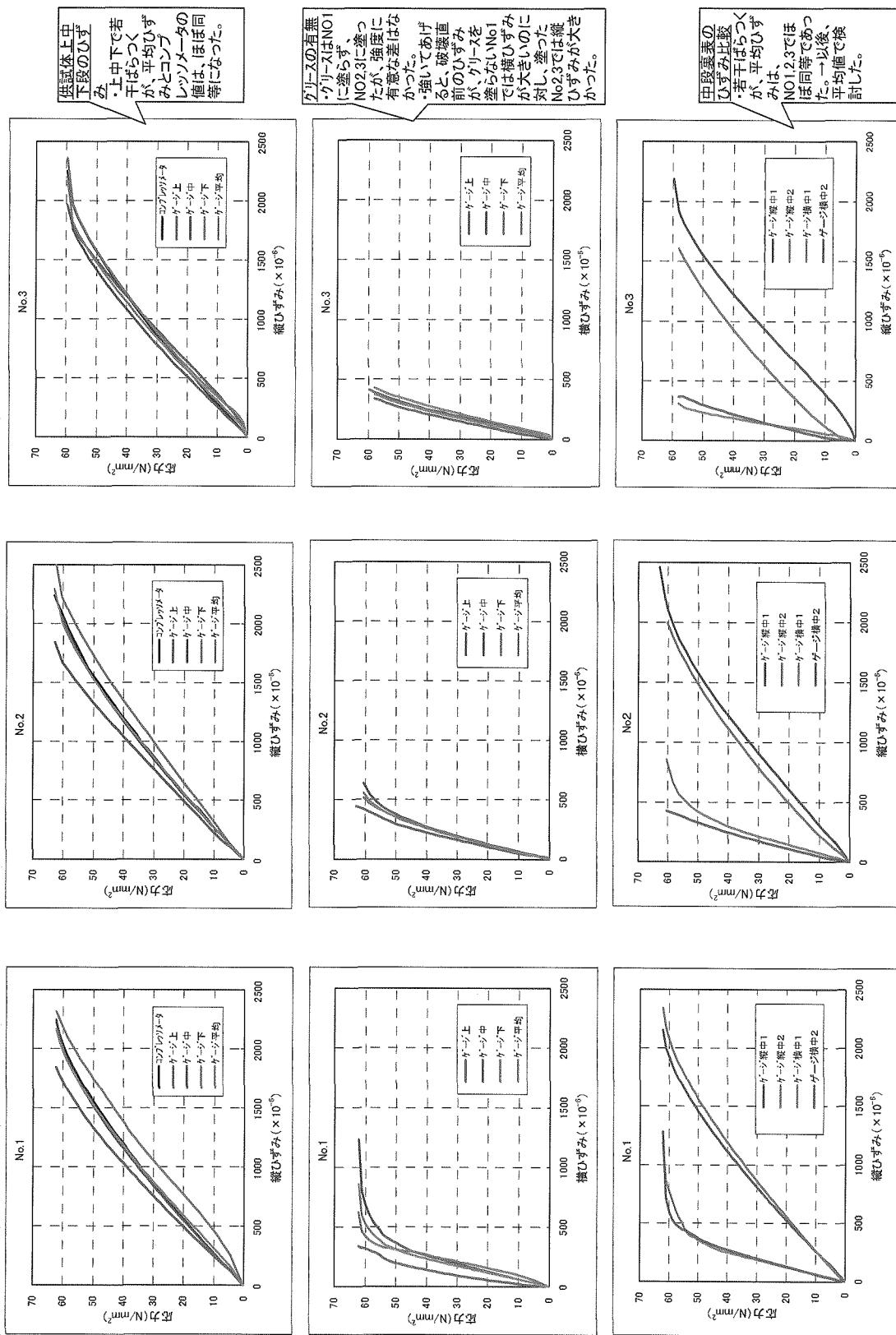
## ・ひずみ測定結果

No		50 μ 時 応力	1/3応力	1/3応力時 縦ひずみ (× 10 <sup>-6</sup> )	1/3応力時 横ひずみ (× 10 <sup>-6</sup> )	静ポアソン比 $\nu$	静弾性係数 $E$ (kN/mm <sup>2</sup> )
1	コンプレッソメータ	1.79	20.83	585	62	0.12 0.23 0.21 0.20	35.6 40.7 36.6 26.8 34.4
	ゲージ上	1.93	20.83	515			
	ゲージ中	1.80	20.83	570			
	ゲージ下	0.97	20.83	791			
	ゲージ平均	1.49	20.83	612			
2	コンプレッソメータ	1.80	20.91	585	111 134 164 128	0.21 0.23 0.19 0.22	35.7 39.5 36.3 30.0 35.2
	ゲージ上	2.22	20.91	523			
	ゲージ中	1.76	20.91	578			
	ゲージ下	1.82	20.91	687			
	ゲージ平均	1.87	20.91	591			
3	コンプレッソメータ	1.52	19.91	564	133 100 148 118	0.21 0.20 0.25 0.21	35.8 32.6 39.9 35.7 37.1
	ゲージ上	0.71	19.91	639			
	ゲージ中	1.51	19.91	512			
	ゲージ下	0.56	19.91	592			
	ゲージ平均	0.89	19.91	563			

**ポアソン比の比較**  
・1/3応力時のひずみから算定した静ポアソン比は、動ポアソン比より若干小さくなった。  
・この理由は、横ひずみに小さいものが含まれているためと考えられる。

**弾性係数の比較**  
・コンプレッソメータとゲージにより測定された静弾性係数は、ほぼ同等であった。  
・動弾性係数は、静弾性係数より大きく測定された。

表付 3-1 弾性波速度による HFSC コンクリートの変形特性



図付 3-1 応力とひずみの関係

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	$m^2$
立体	積立法メートル	$m^3$
速度	メートル毎秒	$m/s$
加速度	メートル毎秒毎秒	$m/s^2$
波数	メートル毎メートル	$m^{-1}$
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	$kg/m^3$
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	$m^3/kg$
電流密度	アンペア毎平方メートル	$A/m^2$
磁界の強さ	アンペア毎メートル	$A/m$
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	$mol/m^3$
輝度	カンデラ毎平方メートル	$cd/m^2$
屈折率(数の)	1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
$10^{24}$	ヨタ	Y	$10^{-1}$	デシ	d
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	c
$10^{18}$	エク	E	$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{15}$	ペタ	P	$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{12}$	テラ	T	$10^{-9}$	ナノ	n
$10^9$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	p
$10^6$	メガ	M	$10^{-15}$	フェムト	f
$10^3$	キロ	k	$10^{-18}$	アト	a
$10^2$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼット	z
$10^1$	デカ	da	$10^{-24}$	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad	$m \cdot m^{-1}=1^{(b)}$
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2}=1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	$s^{-1}$
圧力、応力	パスカル	Pa	$N/m^2$
エネルギー、仕事、熱量	ジユール	J	$N \cdot m$
功率、放射束	ワット	W	$J/s$
電荷、電気量	クーロン	C	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	$W/A$
静電容量	アラド	F	$C/V$
電気抵抗	オーム	Ω	$V/A$
コンダクタンス	スージメンス	S	$A/V$
磁束密度	テスラ	T	$Wb/m^2$
インダクタンス	ヘンリイ	H	$Wb/A$
セルシウス温度	セリシウス度	°C	K
光照度	ルクス	lx	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種の)放射能吸収線量、質量エネルギー一分与、カーマ	ベクレル	Bq	$lm/m^2$
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量	シーベルト	Sv	$J/kg$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	$m \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エンタルピー	ワット每ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール每キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール每キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m · K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン每立方メートル	C/m <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン每平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	フアラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1L=1 \text{ dm}^3=10^{-3} \text{ m}^3$
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$
ネーベル	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) \ln 10 (Np)$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{ J}$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} \text{ m}$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里每時=(1852/3600)m/s
アール	a	$1a=1 \text{ dam}^2=10^2 \text{ m}^2$
ヘクタール	ha	$1ha=1 \text{ ha}^2=10^4 \text{ m}^2$
バル	bar	$1bar=0.1 \text{ MPa}=100 \text{ kPa}=1000 \text{ hPa}=10^5 \text{ Pa}$
オングストローム	Å	$1 \text{ Å}=0.1 \text{ nm}=10^{-10} \text{ m}$
バーン	b	$1b=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{ m}^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 \text{ erg}=10^{-7} \text{ J}$
ダイナ	dyn	$1 \text{ dyn}=10^{-5} \text{ N}$
ボアズ	P	$1 P=1 \text{ dyn} \cdot s/cm^2=0.1 \text{ Pa} \cdot s$
ストップス	St	$1 \text{ St}=1 \text{ cm}^2/\text{s}=10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} \text{ T}$
エルステップス	Oe	$1 Oe=(1000/4\pi) \text{ A/m}$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^{-8} \text{ Wb}$
スチルブ	sb	$1 sb=1 \text{ cd}/\text{cm}^2=10^4 \text{ cd}/\text{m}^2$
ホル	ph	$1 ph=10^4 \text{ lx}$
ガル	Gal	$1 Gal=1 \text{ cm}/\text{s}^2=10^{-2} \text{ m}/\text{s}^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$
ラド	rad	$1 rad=1 \text{ Gy}=10^{-2} \text{ Gy}$
レム	rem	$1 rem=1 \text{ cSv}=10^{-2} \text{ Sv}$
X線単位	X unit	$1X \text{ unit}=1.002 \times 10^{-4} \text{ nm}$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 \text{ nT}=10^{-9} \text{ T}$
ジャンスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 \text{ fm}=10^{-15} \text{ m}$
メートル系カラット	Torr	$1 \text{ metric carat}=200 \text{ mg}=2 \times 10^{-4} \text{ kg}$
トール	atm	$1 \text{ Torr}=(101.325/760) \text{ Pa}$
標準大気圧	cal	$1 \text{ atm}=101.325 \text{ Pa}$
カロリ	μ	$1 \mu=1 \mu \text{m}=10^{-6} \text{ m}$
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \mu \text{m}=10^{-6} \text{ m}$