JAEA-Research
2010-055

幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメント系材料の適用性

-140m 調査坑道における原位置吹付け施工試験 -

Study on Applicability of Low Alkaline Cement in Horonobe Underground Research Laboratory Project
- In-situ Experiment at 140m Gallery -

中山 雅　佐藤 治夫　杉田 裕　野口 聡
Masashi NAKAYAMA, Haruo SATO, Yutaka SUGITA and Akira NOGUCHI

地層処分研究開発部門
幌延深地層研究ユニット
Horonobe Underground Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directrate

February 2011
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

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメント系材料の適用性
-140m 調査坑道における原位置吹付け施工試験-

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
中山　雅，佐藤　治夫，杉田　裕，野口　聡※

(2010 年 12 月 6 日受理)

高レベル放射性廃棄物の処分施設は，地下 300m 以深に建設されることから，坑道の空洞安定性確保や周辺岩盤のゆるみ領域の抑制，掘削に伴う湧水量の抑制のため，セメント系材料を用いた吹付けコンクリートやグラウトが検討されている。従来の地下構造物に一般的によく用いられるセメント系材料として，普通ポルトランドセメント（OPC）がある。このセメントはセメント硬化体の細孔溶液中に含まれるアルカリ成分により, pH が 12~13 程度の高アルカリ性を呈する。

地層処分施設においては，上記の高アルカリ成分が地下水に溶出した場合，緩衝材を構成するベントナイトや周辺の岩盤を変質させ，人工バリアおよび天然バリアとしての性能に影響を与えることが懸念されている。このような影響を低減するために，幌延深地層研究計画においては，低アルカリ性セメント（HFSC: Highly fly-ash contained silicafume cement）を開発し，化学的特性，機械的特性，施工性，鉄筋の耐腐食性などについて検討を実施してきた。HFSC はポゾラン反応により，浸出液の pH の低減を指向しており，普通ポルトランドセメント（OPC）にポゾラン材料であるシリカフュームおよびフライアッシュを混合したセメント系材料である。

現在までの検討結果から，HFSC が幌延の地下施設の設計基準強度を上まわる強度発現が可能であること，OPC と同等の施工性を有することが室内試験および模擬トンネルへの吹付け試験などを通じて示されたことから，幌延の地下施設の 140m 調査坑道において，吹付け施工試験を実施し，実際の掘削サイクルの中での施工性確認などを目的とした原位置施工試験を実施した。その結果, HFSC は OPC と同等もしくは良好な施工性を示し, 地下坑道への適用性が確認された。

これまで，低アルカリ性セメントを用いた小規模な吹付け施工試験は海外で例があるものの，今回実施した幌延の地下施設での原位置試験のように，低アルカリ性セメントを実際の坑道の工事に使用した本格的な施工は世界初である。

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
※技術開発協力員（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
- In-situ Experiment at 140m Gallery -

Masashi NAKAYAMA, Haruo SATO, Yutaka SUGITA and Akira NOGUCHI※

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

(Received December 6, 2010)

In Japan, any high-level radioactive waste repository is to be constructed at over 300m depth below surface. Tunnel support is used for safety during the construction and operation, and shotcrete and concrete lining are used as the tunnel support. Concrete is a composite material comprised of aggregate, cement and various additives. Low alkaline cement has been developed for the long term stability of the barrier systems whose performance could be negatively affected by highly alkaline conditions arising due to cement used in a repository. Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has developed a low alkaline cement, named as HFSC (Highly fly-ash contained silicafume cement), containing over 60wt% of silica-fume (SF) and coal ash (FA).

JAEA is presently constructing an underground research laboratory (URL) at Horonobe for research and development in the geosciences and repository engineering technology. HFSC was used experimentally as the shotcrete material in construction of part of the 140m deep gallery in Horonobe URL. The objective of this experiment was to assess the performance of HFSC shotcrete in terms of mechanics, workability, durability, and so on. HFSC used in this experiment is composed of 40wt% OPC (Ordinary Portland Cement), 20wt% SF, and 40wt% FA. This composition was determined based on mechanical testing of various mixes of the above components. Because of the low OPC content, the strength of HFSC tends to be lower than that of OPC in normal concrete. The total length of tunnel constructed using HFSC shotcrete is about 73m and about 500m^3 of HFSC was used. confirmed The workability of HFSC shotcrete was confirmed by this experimental construction.

Although several in-situ experiments using low alkaline cement as shotcrete have been performed at a small scale, this application of HFSC at the Horonobe URL is the first full scale application of low alkaline cement in the construction of a URL in the world. In this report, we present detailed results of the in-situ construction test.

Keywords: Geological Disposal, HLW, HFSC, pH Behavior, Cement Hydrates

※Collaborating Engineer (Geological Isolation Research Unit)

目 次

1. はじめに 1

2. HFSC 開発の課題および原位置試験計画の概要 2

2.1 ポゾラン反応 2

2.2 HFSC における低アルカリ化の基本的な考え方と課題 2

2.3 深度 140m 調査坑道における原位置試験計画の概要 3

3. 地上での試験 5

3.1 基本配合および使用材料 5

3.2 試験練り・試験吹付け 5

4. 調査坑道での試験 14

4.1 試験概要 14

4.2 吹付けコンクリートの性状確認 17

4.3 硬化コンクリートの品質確認 20

5. まとめ 24

参考文献 25

Contents

1. Introduction 1

2. Background and Aim 2

2.1 Pozzolanic Reaction 2

2.2 Basic Idea and Problem of Low Alkalinization in HFSC 2

2.3 Outline of the In-situ Experiment Plan 3

3. Examination on the Ground 5

3.1 Mix Proportion of Base Concrete and Using Materials 5

3.2 Confirming Initial Properties and Applicability 5

4. Examination in 140m Gallery 14

4.1 Outline of the Examination 14

4.2 Confirmination of Shotcrete Properties 17

4.3 Confirmination of HFSC Quality after Hardened 20

5. Summery 24

Reference 25

図目次

図 1　140m 調査坑道における原位置試験フロー 3
図 2　原位置試験実施場所 4
図 3　構内コンクリートプラント(H21.3.5 撮影) 6
図 4　試験練り実施状況（OPC-1） 8
図 5　試験練り実施状況（HFSC-1） 8
図 6　圧縮強度試験(σ28:OPC-1) 8
図 7　圧縮強度試験(σ28:HFSC-1) 8
図 8　圧縮強度試験結果 9
図 9　供試体吹付け図 9
図 10　コーン部断面形状図 10
図 11　型枠設置状況 11
図 12　試験吹付け状況 11
図 13　型枠吹付け状況 11
図 14　試験吹付けによる強度試験結果 12
図 15　140m 調査坑道における試験箇所 14
図 16　140m 調査坑道断面図 15
図 17　吹付け施工のイメージ 15
図 18　コンクリート運搬状況 16
図 19　粉じん濃度測定器(LD-3K2) 19
図 20　圧縮強度の経時変化 22
図 21　コア切断面 23

表目次

表 1　支保工に対する要件 1
表 2　吹付けコンクリートの配合仕様 5
表 3　基本配合 5
表 4　使用材料 5
表 5　試験練り実施項目 7
表 6　試験練り配合（網掛けは採用配合） 7
表 7　採用配合の試験結果 8
表 8　試験吹付け実施項目 9
表 9　主要機械 10
表 10　試験吹付け強度試験結果 12
表 11　はね返り率測定結果 12
表 12　採用配合（表 6 を参照） 14
表 13　施工数量 16
表 14　試験・測定項目 17
表 15　坑道内での試験断面 17
表 16　フレッシュコンクリートの性状 17
表 17　目視確認結果と吐出量 18
表 18　圧送距離 18
表 19　はね返り率 18
表 20　粉じん濃度 19
表 21　急結剤添加率 19
表 22　吹付け施工性評価項目 20
表 23　施工性評価結果 20
表 24　強度試験結果 21
表 25　コア強度比の比較 22
表 26　単位体積重量の比較 23
表 27　単位体積重量（理論値） 23

This is a blank page.

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物(HLW)の処分施設は，地下 300m 以深に建設されることから，坑道の空洞安定性確保や周辺岩盤のゆるみ領域の抑制，掘削に伴う湧水量の抑制のため，セメント系材料を用いた吹付けコンクリートやグラウトが検討されている。また，坑道埋め戻し時に設置されるプラグのうち，埋め戻し材に混合されるベントナイト等の膨潤応力に対する反力を確保するための力学プラグについてもコンクリートの使用が想定されている[1)]。HLW 処分施設の建設に用いられる支保工に関する要求性能については，表 1 のようにまとめられている[2)]が，設計要件のうち，力学安定性と施工性は，一般的な支保工においても要求される事項であり，化学的安定性は HLW 処分施設に特有な要件である。

表 1　支保工に対する要件

設計要件	概要
力学安定性 （本来的に必要な機能）	建設～閉鎖までの期間において，周辺岩盤を安定的に保持
化学的安定性 （人工バリアを保護する機能）	コンクリートと緩衝材の接触により，緩衝材が許容限度を超えて劣化することを回避 コンクリートの劣化により，支保工部分が許容限度を超えた高透水ゾーンとなることを回避
施工性 （付随して期待する機能）	地山安定のため早期架設が可能で初期強度の発現が早い支保工を選択

従来の地下構造物に一般的によく用いられるセメント系材料として，普通ポルトランドセメント（Ordinary Portland Cement; OPC）がある。このセメントは，セメント硬化体の細孔溶液中に含まれる $Ca(OH)_2$，KOH，NaOH などのアルカリ成分により，pH が 12~13 程度の高アルカリ性を呈する。この特性により，鉄筋コンクリート中の鉄筋の表面に不導体皮膜が生成され，鉄筋の耐腐食性が高められ，鉄筋コンクリートが長期にわたりその性能を保持するために必要な条件となっている。

一方，HLW 処分施設では，上記のセメント硬化体中に含まれる高アルカリ成分が地下水に溶出した場合，緩衝材を構成するベントナイトや周辺の岩盤を変質させ，人工バリアおよび天然バリアとしての性能に影響を与えることが懸念されている。このため，国内外の各機関においてコンクリートからの浸出水の pH を 10.5～11 程度に抑える低アルカリ性セメントの開発が行われているとともに，高アルカリ性のセメント系材料からの，緩衝材や岩盤の性質に与える影響が様々な研究機関で検討されている[例えば3),4)]。また，セメント系材料は，水和生成物の地下水への溶脱などによる劣化に伴い，核種移行経路となる可能性もあることから，セメントの長期挙動特性を把握する事も重要であるとされている[5)]。

原子力機構では，セメント系材料の低アルカリ性を担保する材料として，OPC を 50%以上シリカフューム（Silicafume; SF）およびフライアッシュ（Fly-ash; FA）で置換した低アルカリ性セメントである，HFSC（Highly Fly-ash contained Silicafume Cement）を開発している[6)]。HFSC は，ポゾラン材料である，SF や FA のポゾラン反応により，セメント水和物中で高アルカリ性を示す $Ca(OH)_2$ を珪酸カルシウム水和物（CSH）などの難溶性の水和物に変化させ，$Ca(OH)_2$ の量を減少させるとともに，カルシウムシリカモル比を OPC のみの場合よりも低下させることにより，pH を低下させることを指向した材料である。

本報告書では，幌延の地下施設において実施した，HFSC を用いた吹付けコンクリートの原位置試験について報告する。

2. HFSC 開発の課題および原位置試験計画の概要

本章では，始めに HFSC の低アルカリ化の基本となるポゾラン反応について概説した後に，HFSC 開発における基本的な考え方と課題，原位置試験計画の概要について述べる。

2.1 ポゾラン反応

ポゾランとは，水の存在下で $Ca(OH)_2$ またはカルシウムイオンと反応して新たな水和物を生成する，SiO_2 や Al_2O_3 に富んだ組成物をいい，天然ポゾランと人工ポゾランに分類される。天然ポゾランとしては，シラスや白土，火山灰に起因するものがあり，人工ポゾランとしては FA，高炉スラグ，SF，もみ殻灰などがある。

ポゾラン反応とは，セメント水和物の $Ca(OH)_2$ とポゾラン材料に含まれる SiO_2 が反応し，CSH を生成する反応である。この CSH はセメントの細孔構造を緻密にし，長期強度の増進，水密性の向上などコンクリートの耐久性を高めるはたらきがあるが，その反応機構から十分な水の供給が必要とされる。また，ポゾラン反応により生成した CSH はセメントから生成されるものに比べて，低カルシウムであるとされている[7]。一般に，ポゾラン材料を用いたコンクリートは耐久性が高いと言われるが，ポゾラン反応には水の存在が不可欠であるため，十分な湿潤養生を行うことが条件となる。また，コンクリートの早期劣化として問題となるアルカリ骨材反応については，ポゾラン反応により生成した CSH がセメント水和物中の水酸化アルカリを消費･吸着するなどの抑制効果が認められている。しかし，ポゾラン材料を大量に用いると，$Ca(OH)_2$ の消費による自己中性化が生じ，鉄筋の耐腐食性に対する悪影響が懸念される。

配合上の取り扱いは，ポゾラン材料を結合材として考慮するセメント置換と，結合材として考慮しない骨材置換がある。HFSC は SF および FA をセメント置換として配合している。

2.2 HFSC における低アルカリ化の基本的な考え方と課題

高アルカリ性分が緩衝材や周辺岩盤に与える影響として，pH を 11 以下にすることで緩衝材としての使用 HFSC は，SF と FA を大量にセメント置換し，ポゾラン反応により低アルカリ化を指向している。水結合材比を 150wt%とした場合，OPC:SF:FA=4:2:4 の配合で pH10.4，OPC:SF=3:7 の配合で pH10.0 と，pH を 11 以下に抑制できたという報告がある[8]。一方で，SF は粒径が 0.1μm 程度の微粒子であるため，OPC の 70%以上を置換すると，練り混ぜ後の粘性が増加し，流動性が低下する。このため，HFSC では SF の混合率は 20%で一定にし，FA で 30%以上を代替することとしている[9]。

HFSC を用いたコンクリートの課題として，以下の事が考えられる。FA は火力発電所からの工業副産物であるため，石炭種の違いやボイラーの燃焼温度の影響により，粒径，比表面積，組成などの品質が変動し，コンクリートの品質へ悪影響を与えることが懸念される。特に，FA に含まれる未燃カーボンは，AE 減水剤などの化学混和剤を吸着するため，スランプロスが生じ，圧送性などの施工性が低下することが懸念される。強度発現については，OPC のみを使用したコンクリートと比較して，強度発現が遅くなることも懸念される。また，間隙水の pH が低い（pH≦11）ことから，鉄筋コンクリートとして用いた場合に，鉄筋が腐食しやすくなることが考えられる。

HFSC を用いたコンクリートに対して，このような課題に含め化学的特性，機械的特性，施工性，鉄筋の耐腐食性などについて検討を実施している[10]。以下に，本報告書に関連する，HFSC の吹付けコンクリートに関する検討について，概略を述べる。

HFSC は OPC を多量のポゾラン材料で置換していることから，設計基準強度として用いられる材齢 28 日強度は OPC のみの場合と比べて低くなる傾向がある。そのため，強度発現が期待できるよう，OPC の割合をできるだけ大きくするために，ポゾラン材料を pH 低下が期待される 60%とした HFSC（OPC:SF:FA=4:2:4）を中心に検討を行った。

フライアッシュの品質変動による影響については，炭種が変わったと想定される時期に生産された 13 種類の FA（JIS I 種：4 種類，JIS II 種：9 種類）を使用して，強熱源量や比表面積などの FA の品質やスランプフローなどのフレッシュコンクリートの特性，材齢 28 日までの強度試験

などを実施した。その結果，JIS II 種相当の FA で有れば，HFSC のコンクリートとしての品質に与える影響は小さいとしている[11), 12)]。

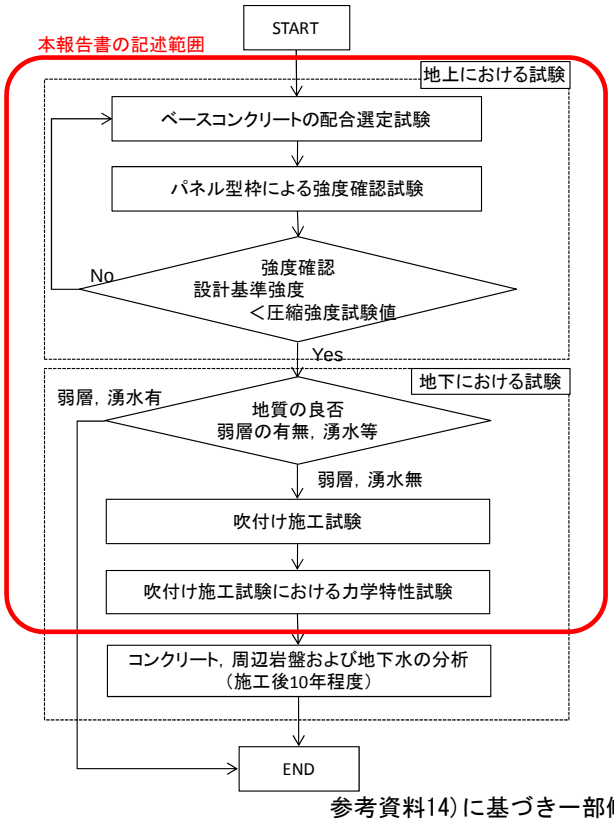
強度に対しては，目標強度として，幌延の地下施設における水平坑道の設計基準強度（36N/mm²）を設定し，配合の選定や模擬トンネルへの吹付け試験などを実施して，高強度化を図り，設計基準強度をほぼ満足する配合を選定した[13)]。

2.3 深度 140m 調査坑道における原位置試験計画の概要

原位置試験は，水平坑道である深度 140m 調査坑道（図 2）の掘削サイクル内で実施することとなるため，試験により施工されるコンクリートには，空洞安定のための十分な力学特性，施工性を有していることが必要となる。しかし，HFSC 吹付けコンクリートは模擬トンネルに対する試験施工は実施しているものの，実際の坑道内での施工実績が無く，万が一，力学特性，施工性などに不備が有った場合には，幌延も地下施設工事の安全性確保や工程，ひいては幌延深地層研究計画に重大な影響を与える可能性がある。

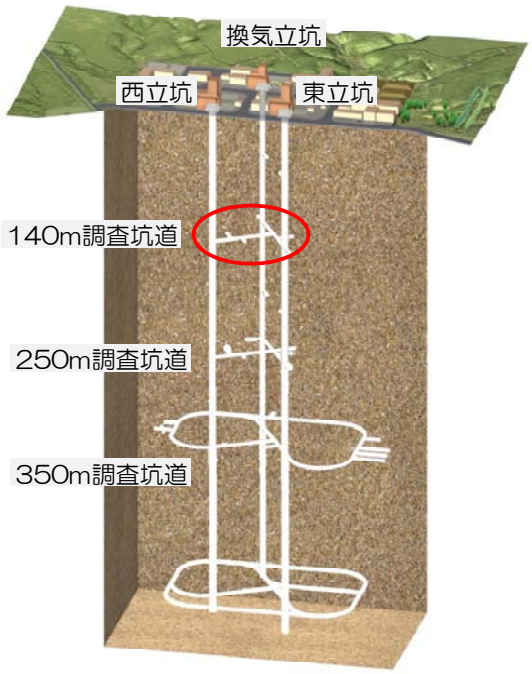
そこで，本計画では，坑内での吹付けに先立ち，実際に工事で使用するプラントおよび吹付け機器などを用いて，地上で吹付け試験を実施し HFSC 吹付けコンクリートが十分な強度および施工性を有することを確認する。地上での試験で十分な安全性を確認した上で，坑内での環境下における HFSC 吹付けコンクリートの力学的性能，施工性能，耐久性能について調査・試験を実施することとした[14)]。原位置試験計画のフロー図を図 1 に示す。このフロー図は，参考資料 14)を元に一部修正したものである。

本報告書では，図 1 に太枠で示した，コンクリート，周辺岩盤および地下水の分析を除いた各試験結果について述べる。



参考資料14)に基づき一部修正

図 1　140m 調査坑道における原位置試験フロー



このイメージ図は、今後の調査研究の
結果次第で変わることがあります

図 2　原位置試験実施場所

3. 地上での試験

3.1 基本配合および使用材料

これまでに，HFSC 吹付けコンクリートが幌延の地下施設建設の設計基準強度（材齢 28 日：36N/mm2）を満たす配合を選定するに当たって，室内試験および模擬トンネルへの吹付け試験などを実施し[5),6)]，現地で使用している材用を元に基本配合を設定した[10)]。表 2 に配合仕様を，表 3 に基本配合を示す。

表 2　吹付けコンクリートの配合仕様

セメント種類	呼び強度 (N/mm^2)	粗骨材の最大寸法 (mm)	最大水セメント比 (%)	スランプ (cm)	最小単位粉体量 (kg/m^3)	繊維補強材
HFSC	36	15	35	21±2	360	有り -
OPC	36	15	60	21±1.5	360	有り -

表 3　基本配合[10)]

配合	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m^3)							
			水	結合材 B			細骨材	粗骨材	混和剤	繊維補強材
			W	OPC	SF	FA	S	G	Ad*	Fi
OPC-1	42.5	56.9	170	400	-	-	1,072	809	2.00	-
OPC-2	42.5	56.9	170	400	-	-	1,072	809	2.00	9.1
HFSC-1	35.0	59.7	175	200	100	200	935	628	5.25	-
HFSC-2	35.0	59.7	175	200	100	200	935	628	5.25	9.1
HFSC-3	30.0	59.7	150	200	100	200	974	655	5.25	-
HFSC-4	30.0	59.7	150	200	100	200	974	655	5.25	9.1

*OPC；高性能減水剤 NT-1000，B×0.50%
HFSC；高性能 AE 減水剤レオビルド SP8SV，B×1.05%

使用した材料を表 4 に示す。地下施設建設工事では，高炉セメントおよび早強セメントを使用しているため，HFSC の配合のために新たに準備した材料は OPC，SF および高性能 AE 減水剤であり，それ以外は地下施設建設工事に用いられている材料と同じものである。

表 4　使用材料

材料名	種類	産地/製造元
セメント(OPC)	普通ポルトランドセメント	室蘭市/日鉄セメント(株)
シリカフューム(SF)	マイクロシリカ 940grade	ノルウェー/エルケムジャパン(株)
フライアッシュ(FA)	JIS II 種	苫東厚真発電所/北電興業(株)
細骨材	砂	幌延町浜里産/幌延砂利工業(株)
粗骨材	砂利(5-13mm)	浜頓別産/岡本興業(株)
混和剤	高性能減水剤(NT-1000)	-/(株)ポゾリス物産
	高性能 AE 減水剤(レオビルド SP8SV)	
繊維補強材	バルチップ M-K	-/萩原工業(株)
急結剤	デンカナトミック TYPE-10	-/電気化学工業(株)
水	井戸水	幌延町/-

3.2 試験練り・試験吹付け

140m 調査坑道での施工に先立ち，幌延の地下施設建設で実際に使用しているコンクリートプラントを用いた試験練りを行い，最終的な配合選定を行った。また，工事で使用している機材を使用して，選定した配合で地上での試験吹付けを行い，施工性についても確認した。試験練りおよび試験吹付けを実施した日付は以下のとおりである。

試験実施日

試験練り（OPC, HFSC）：平成 21 年 3 月 5 日　構内コンクリートプラント前

試験吹付け（OPC, HFSC）：平成 21 年 3 月 6 日　構内コンクリートプラント前

図 3 に試験練りおよび試験吹付けを実施した構内コンクリートプラントの状況を示す。

図 3　構内コンクリートプラント(H21.3.5 撮影)

3.2.1 試験練り

試験練りでは，スランプ試験を実施し，規格値（HFSC:21±2cm，OPC:21±1.5cm）を満足する配合を選定したのちに，その配合について，表 5 に示した残りの試験を実施した。

試験練りを実施した配合を表 6 に時系列順に示す。以下に，基本配合から採用配合までの経緯を示す。

OPC

- OPC-1(基本配合):スランプが規格値を下まわったため,水結合材比を調整→OPC-1-2。
- OPC-1-2：スランプが規格値を上まわったため，水結合材比を調整→OPC-1-3。
- OPC-1-3：スランプが規格値に収まったので，この配合を採用。
- OPC-2-2：OPC-1-3 に繊維補強材を添加した配合でスランプ試験を実施。スランプが規格値に収まったので，この配合を採用。

HFSC

- HFSC-1（基本配合）：水分が多く材料分離傾向が見られ，スランプの測定が不可能であったため，混和剤を減少→HFSC-1-2。
- HFSC-1-2:水分が多く材料分離傾向が見られ,スランプの測定が不可能であったため,さらに混和剤を減少→HFSC-1-3。
- HFSC-1-3：水分が多く材料分離傾向が見られ，スランプが規格値を上まわったため，水結合材比を減少→HFSC-1-4。
- HFSC-1-4：HFSC-1-3 よりも改善されたが，水分が多く材料分離傾向が見られ，スランプが規格値を上まわったため，さらに水結合材比を減少→HFSC-1-5。
- HFSC-1-5：スランプが規格値に収まったので，この配合を採用。
- HFSC-2-2：HFSC-1-5 に繊維補強材を添加した配合で試験練りを実施。スランプが規格値に収まったので，この配合を採用。

表 5　試験練り実施項目

試験項目	試験方法	規格値	備考
スランプ試験	JIS A 1101	HFSC:21±2cm／OPC :21±1.5cm	
スランプフロー試験	JIS A 1150		参考値
空気量試験	JIS A 1128		参考値
コンクリート温度測定			参考値
圧縮強度試験(σ7，σ28，σ91)	JIS A 1108	σ28：3 回の平均値が呼び強度(36N/mm^2)以上	

表 6　試験練り配合（網掛けは採用配合）

配合 No.	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m^3) 水 W	結合材 B OPC	SF	FA	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad*	繊維補強材 Fi
OPC-1 (基本配合)	42.5	56.9	170	400	-	-	1,072	809	2.00 (B×0.50%)	-
OPC-1-2	44.5	56.9	178	400	-	-	1,060	800	2.00 (B×0.50%)	-
OPC-1-3	43.3	56.9	173	400			1,068	806	2.00 (B×0.50%)	-
OPC-2-2	43.3	56.9	173	400			1,068	806	2.00 (B×0.50%)	9.1
HFSC-1 (基本配合)	35.0	59.7	175	200	100	200	935	628	5.25 (B×1.05%)	-
HFSC-1-2	35.0	59.7	175	200	100	200	935	628	4.25 (B×0.85%)	-
HFSC-1-3	35.0	59.7	175	200	100	200	935	628	3.25 (B×0.65%)	-
HFSC-1-4	32.0	59.7	160	200	100	200	959	644	3.25 (B×0.65%)	-
HFSC-1-5	30.0	59.7	150	200	100	200	974	655	3.25 (B×0.65%)	-
HFSC-2-2	30.0	59.7	150	200	100	200	974	655	3.25 (B×0.65%)	9.1

*OPC；高性能減水剤 NT-1000
HFSC;高性能 AE 減水剤レオビルド SP8SV

上記により決定した採用配合に対して，表 5 に示した試験の結果を表 7 に示す。なお、圧縮強度試験は、繊維補強材を添加していない配合についてのみ実施した。今後，採用配合は繊維補強材を配合しないものに「-1」，繊維補強材を配合するものに「-2」と付記し，OPC-1，OPC-2，HFSC-1，HFSC-2 と表す。圧縮強度試験の結果、採用した OPC-1 および HFSC-1 の両配合ともに材齢 28 日において呼び強度を上まわることが確認された。試験練りの実施状況を図 4 および図 5 に，圧縮強度試験の状況を図 6 および図 7 に示す。また，図 8 に圧縮強度試験結果を示す。

表 7　採用配合の試験結果

試験項目		OPC-1 (OPC-1-3)		OPC-2 (OPC-2-2)	HFSC-1 (HFSC-1-5)		HFSC-2 (HFSC-2-2)	規格値
スランプ(cm)		21.5		20.0	23.0		21.0	HFSC:21±2cm OPC :21±1.5cm
スランプフロー(mm)		390 x 365		295 x 275	450 x 435		390 x 380	―
空気量(%)		3.3		2.7	6.5		7.0	―
コンクリート温度(°C)		11.0		12.0	16.0		16.0	―
圧縮強度(N/mm²)	σ7	48.3 47.4 48.3	48.0	―	33.0 32.6 32.1	32.6	―	―
	σ28	66.5 68.0 68.2	67.6	―	64.3 64.6 57.8	62.2	―	3 回の平均値が呼び強度(36N/mm²)以上
	σ91	69.8 70.0 71.3	70.4	―	66.3 68.5 70.9	68.6	―	―

図 4　試験練り実施状況（OPC-1）

図 5　試験練り実施状況（HFSC-1）

図 6　圧縮強度試験(σ28:OPC-1)

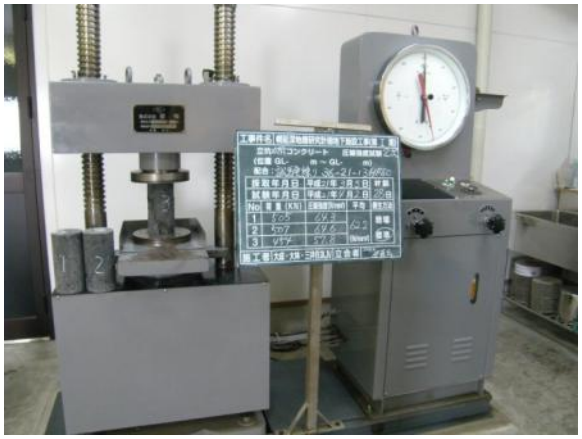


図 7　圧縮強度試験(σ28:HFSC-1)

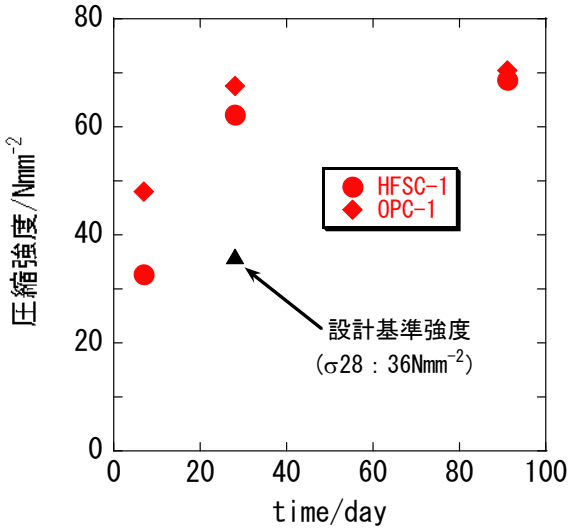


図 8　圧縮強度試験結果

3.2.2 試験吹付け

試験練りで決定した採用配合について、繊維補強材を含まない、OPC-1 および HFSC-1 に対して、実機を用いた試験吹付けを実施した。なお，急結剤の添加量は結合材重量に対して 10%とした。試験吹付けでは，各配合の施工性を確認するとともに，表 8 に示す試験・測定を実施した。

表 8　試験吹付け実施項目

試験項目	試験方法	規格値	備考
初期強度試験(3h)	JSCE-G 561-1999	1.5 N/mm^2 以上	プルアウト法
(24h)		5 N/mm^2 以上	
コア採取による強度試験(σ28)	JSCE-F 561-2005	3 回の平均値が呼び強度(36N/mm^2)以上	
はね返り率測定	JSCE-F 563-2005	-	

初期強度試験

土木学会基準(JSCE-G 561-1999)に準拠し，プルアウト試験方法により実施した。皿形の型枠内にあらかじめ固定されたピンを埋め込むように試料を吹付け（図 9），所定時間（3 時間，24 時間）後に反対側よりピンを引抜き，引抜き力 P と破壊コーンのせん断面積 A よりせん断強度を求め，圧縮強度に換算する方法である（図 10）。供試体数量は同一条件で 3 個とし，養生方法は気乾養生とした。

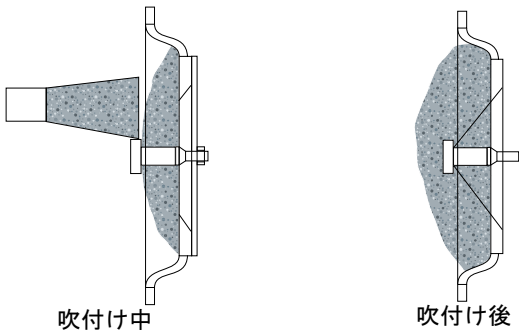
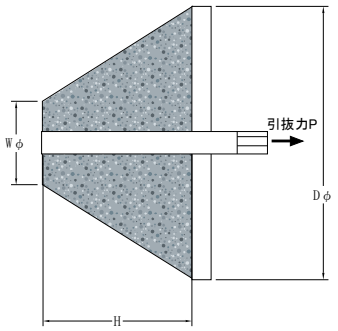


図 9　供試体吹付け図



引抜きせん断強度(N/mm²)：$\tau = \frac{P}{A}$　　P：引抜き力(N)，A：コーン表面積(mm²)

$$A = \pi\left(\frac{D_\varphi}{2} + \frac{W_\varphi}{2}\right)\sqrt{H^2 + \left(\frac{D_\varphi}{2} - \frac{W_\varphi}{2}\right)^2}$$　　D_ϕ=90mm，W_ϕ=30mm，H=55mm

試験値　$\tau = \frac{P}{A} = \frac{P_i \times a}{A}$　　P_i:圧力計ゲージ圧力(MPa)

$\sigma_{(3h,24h)} = 4 \times \tau = P_i \times 1{,}034$　　a：油圧シリンダー受圧面積(mm²)=3,050mm²

図 10　コーン部断面形状図

コア採取による強度試験

土木学会基準(JSCE-F 561-2005)に準拠して実施した。

パネル型枠に吹き付けた試料から，硬化後コンクリートをコアドリルなどを用いて切り出し，供試体（コア：φ50×L100mm）とした。供試体の数量は同一条件で 3 個とし，材齢 28 日で強度試験を実施した。養生方法は気乾養生とした。

はね返り率測定

土木学会基準(JSCE-F 563-2005)に準拠して実施した。

上記のコア採取による強度試験用の型枠への吹付けの際に，型枠に付着した質量と，シート上にはね返った質量から，はね返り率を算出した。

試験吹付けに使用した主要機械の一覧を表 9 に示す。

表 9　主要機械

機械名	仕様・性能	台数	備考
バッチャープラント	2 軸型強制練，1.0m³/バッチ	1	
吹付け機	ロータリー式，6～21m³/h	1	アリバ 285
急結剤供給装置	NATM クリート，150L	2	1 台は予備
トラックミキサー車	10t	2	
積載型トラッククレーン	2.8t 吊り	1	供試体等運搬用
バックホウ	0.7m³ 級	1	吹付けホース介助用

試験吹付けで使用したプルアウト試験用とコア採取用の型枠の設置状況を図 11 に，試験吹付け状況および吹付け後の状況を図 12 および図 13 に示す。

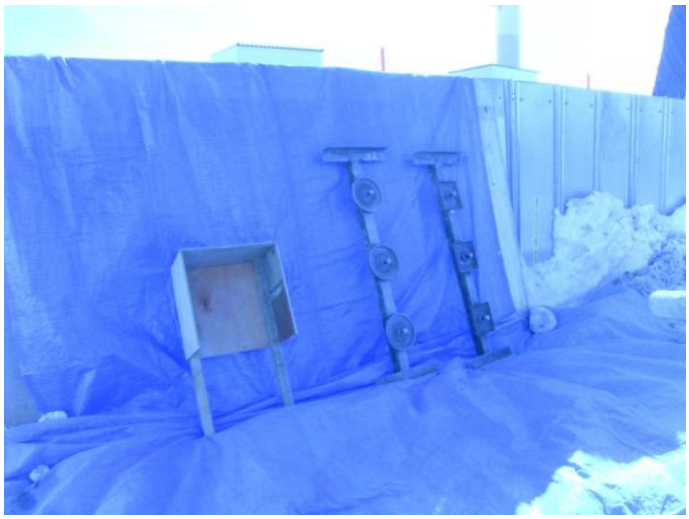


図 11　型枠設置状況

図 12　試験吹付け状況

図 13　型枠吹付け状況

初期強度試験およびコア採取による強度試験結果を表 10 および図 14 に，はね返り率の測定結果を表 11 に示す。

初期強度およびコア採取による強度のどちらも規格値を上まわることが確認された。初期強度においては，HFSC の方が OPC よりも大きな強度を示す傾向が見られたが，水結合材比や急結剤などの違いによるものと考えられる。コア採取による強度試験では，逆に HFSC の方が小さな値を示した。

はね返り率の測定結果では，一般的に 20~30%程度であるのに対し，OPC で 23.9%，HFSC で 13.3%となり，HFSC の方が良好な結果を示した。

表 10　試験吹付け強度試験結果

試験項目		OPC-1		HFSC-1		規格値
初期強度試験 N/mm^2	σ3h	3.82	3.10	7.24	6.72	≧1.5N/mm^2
		2.69		6.72		
		2.79		6.20		
	σ24h	14.5	17.6	17.1	21.4	≧5N/mm^2
		17.6		18.1		
		20.7		28.9		
コア採取による強度試験 N/mm^2	σ28	44.6	44.5	37.7	38.2	3 回の平均値が呼び強度(36N/mm^2)以上
		44.3		38.3		
		44.5		38.7		

表 11　はね返り率測定結果

配合	吹付け量(kg)	リバウンド量(kg)	はね返り率(%)
OPC-1	1024.8	244.6	23.9
HFSC-1	747.0	99.4	13.3

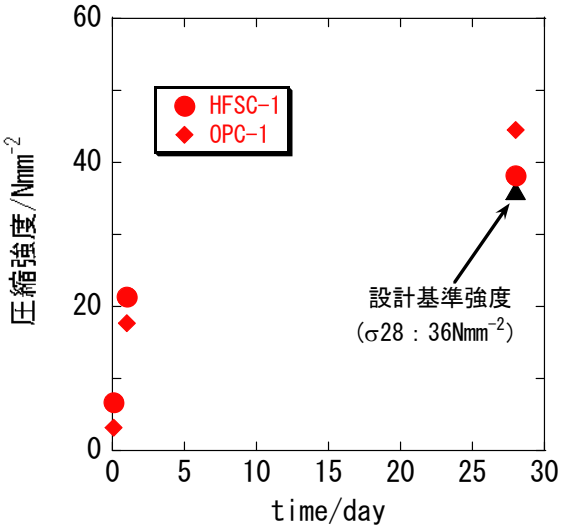


図 14　試験吹付けによる強度試験結果

3.2.3 試験練り・試験吹付け結果のまとめ

試験練りは各配合とも，所定のスランプを得ることができ，設計基準強度を満たす結果となった。コンクリート性状としては，HFSC は OPC よりも粘性が高い傾向が見られ，粉体量が多く，水結合材比が低い事によるものと考えられる。また，高性能 AE 減水剤を使用しているため，空気量が多く計測された。

試験吹付けの結果からも HFSC および OPC どちらも初期強度および設計基準強度の規格値を満たすことが確認された。はね返り率測定結果からは，HFSC の方が OPC よりも良好な結果が得られた。これは HFSC の方が粘性の高い傾向が見られたことと整合する。

設計基準強度を上まわる強度発現があったことと，試験吹付け時の施工状況から施工上問題となりうる設備などの不具合は見受けられなかったことから，HFSC 吹付けコンクリートは，地下施設での施工が可能であると判断された。

4. 調査坑道での試験

3 章での結果を受け，HFSC を用いた吹付けコンクリートは地下施設での施工が可能であることが示されたので，実際の掘削サイクルの中で HFSC 吹付けコンクリートを使用して，深度 140m 調査坑道において施工を実施し，支保工としての適用性および施工性について確認を行った。

4.1 試験概要

地上での試験練りの結果，採用した配合を表 6 から抜粋して表 12 に示す。140m 調査坑道における OPC および HFSC 吹付けコンクリートの施工範囲を図 15 に，調査坑道の断面図を図 16 に示す。図 15 の網掛け部分を OPC-1, HFSC-1（繊維補強無し），その他の部分を OPC-2, HFSC-2（繊維補強有り）で施工した。今回の試験施工の範囲は図 16 中の“吹付けコンクリート”部分であり，“路盤コンクリート”については，早強セメントで施工されている。

表 12　採用配合（表 6 を参照）

配合	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m³)							
			水 W	結合材 B			細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad*	繊維補強材 Fi
				OPC	SF	FA				
OPC-1	43.3	56.9	173	400	—	—	1,068	806	2.00 (B×0.50%)	—
OPC-2	43.3	56.9	173	400	—	—	1,068	806	2.00 (B×0.50%)	9.1
HFSC-1	30.0	59.7	150	200	100	200	974	655	3.25 (B×0.65%)	—
HFSC-2	30.0	59.7	150	200	100	200	974	655	3.25 (B×0.65%)	9.1

*OPC；高性能減水剤 NT-1000
HFSC；高性能 AE 減水剤レオビルド SP8SV

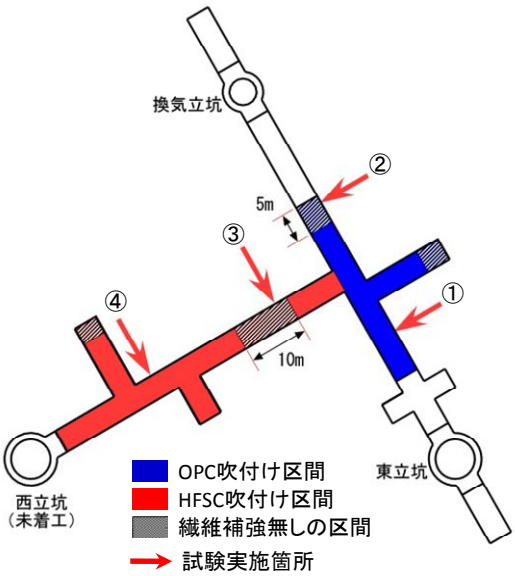


図 15　140m 調査坑道における試験箇所

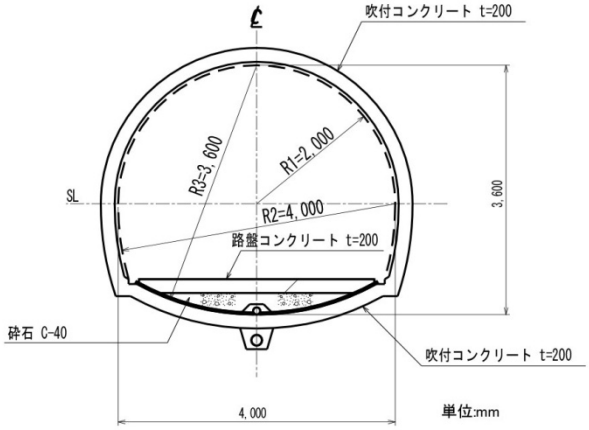


図 16　140m 調査坑道断面図

140m 調査坑道は東立坑側から換気立坑側に掘削を進め，貫通後に西立坑に向けて掘削を行った。吹付けコンクリートの施工イメージを図 17 に示す。構内のバッチャープラントで製造されたコンクリートは，アジテータトラックで東立坑の坑口に搬送され，コンクリートキブルで深度 140m まで搬送される。その後，コンクリート吹付け機またはコンクリートポンプに導入され，小型バックホウに取り付けられた吹付けノズルから切羽へと吹き付けられる。吹付けコンクリートの施工には，表 9 に示した機器を使用した。図 18 に東立坑 GL-140m へのコンクリートの運搬状況を示す。

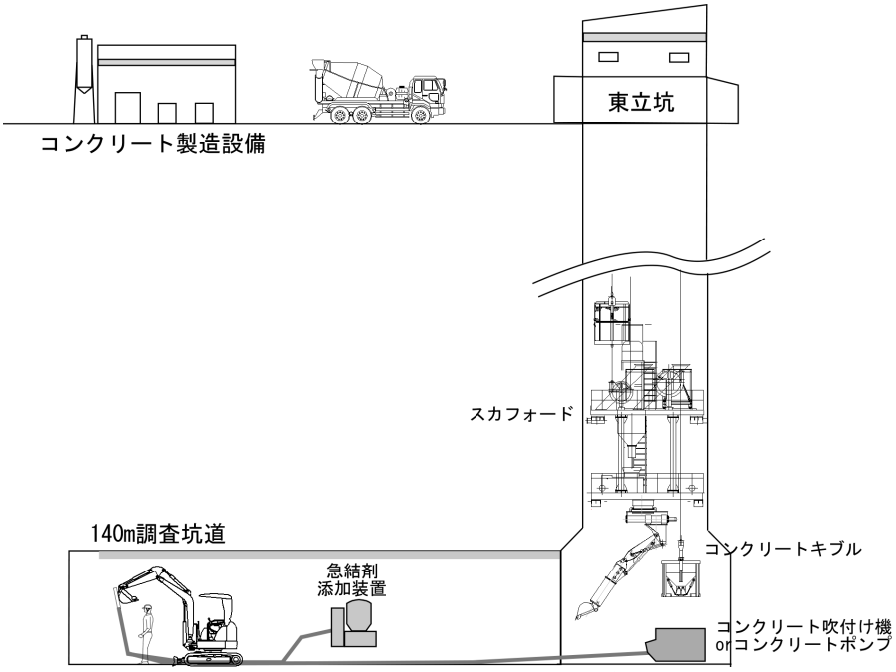


図 17　吹付け施工のイメージ

図 18　コンクリート運搬状況

OPC および HFSC 吹付けコンクリートを用いた原位置施工期間，設計数量および施工実績を表 13 に示す。原位置施工期間中は，切羽の進行は順調であり，HFSC 吹付けコンクリートを掘削サイクルの中で使用しても，特に問題は発生しなかった。施工設計数量に対する施工実績は、HFSC の方が OPC よりも大きくなっているが，これは HFSC 施工区間の方が交差部や妻面部などの余掘りが比較的大きくなる箇所を多く施工したことが影響していると考えられる。

表 13　施工数量

配合	施工期間	設計数量		施工実績		実績/設計
		面積(m²)	厚さ(mm)	吹付け量(m³)	吹付け量(m³)	
OPC-1	H21.4.7～6/1 H21.8.17～8.19(ｲﾝﾊﾞｰﾄ部)	124	200	24.8	40.0	1.61
OPC-2		526	200	105.2	250.2	2.38
		271	50	13.6	30.0	2.21
OPC 計		921	-	143.6	320.2	2.23
HFSC-1	H21.6.2～8.6(ｲﾝﾊﾞｰﾄ部含)	178	200	35.6	81.5	2.29
HFSC-2		794	200	158.8	379.5	2.39
		392	50	19.6	61.0	3.11
HFSC 計		1,364	-	214.0	522.0	2.44

施工中に，調査坑道内で実施した試験および測定項目を表 14 に示す。また，試験断面（図 15 の①～④）の施工日を表 15 に示す。なお，プルアウト試験および圧縮強度試験用の供試体作成については，繊維補強無しで実施した。

表 14　試験・測定項目

	試験・測定項目	仕様など	試験・測定場所
吹付けコンクリートの性状確認	スランプ	JIS A 1101	原位置
	スランプフロー	JIS A 1150	
	空気量	JIS A 1128	
	コンクリート温度	-	
	圧送性	目視確認	
	コンクリート吐出量	アリバまたはポンプ	
	はね返り率	吹付け厚測定法	
	粉じん濃度	LD-3K2 使用	
	急結剤添加率	ナトムクリート 150V	
硬化コンクリートの品質確認	初期強度試験	プルアウト法（σ3h,σ24h）	原位置
	圧縮強度試験	σ7,σ28,σ91	室内
	コア強度試験	σ28	
	気泡観察	断面目視観察法	

表 15　坑道内での試験断面

配合	施工日（アーチ部の 1 次吹付け施工日）	試験断面	繊維補強*
OPC-1	H21.5.12	東連絡坑道 No.31（図 15 の②）	無
OPC-2	H21.4.14	東連絡坑道 No. 9（図 15 の①）	有
HFSC-1	H21.6.10	西連絡坑道 No.13（図 15 の③）	無
HFSC-2	H21.6.25	西連絡坑道 No.33（図 15 の④）	有

＊：プルアウト試験，供試体作成は繊維補強無しで実施

4.2 吹付けコンクリートの性状確認

性状確認試験の項目は，表 14 に示したように，施工前に実施するフレッシュコンクリートの性状確認および施工中に確認あるいは測定する項目に大別される。以下に，確認結果について述べる。

4.2.1 フレッシュコンクリートの性状

試験断面を施工する際に用いたコンクリートについて，フレッシュ性状を確認した。表 16 に結果を示す。いずれの配合もスランプを満たしており，地上試験の結果（表 7）ともほぼ同様の結果となっている。コンクリート温度がやや高めの値を示しているが，地上試験は 3 月上旬の寒冷期に実施したこともあり，外気温の影響と考えられる。このことから，構内のバッチャープラントを使用した場合においても，安定した品質の HFSC が製造できることが示唆された。

表 16　フレッシュコンクリートの性状

	試験位置	スランプ(cm)	スランプフロー(mm)	空気量(%)	コンクリート温度(°C)
①	OPC-2	21.0	420 x 400	5.4	15.0
②	OPC-1	21.0	325 x 320	2.8	16.0
③	HFSC-1	23.0	460 x 440	2.5	17.0
④	HFSC-2	21.5	380 x 380	2.2	19.0
	規格値	OPC:21±1.5 HFSC:21±2.0	－	－	－

4.2.2 圧送性および吐出量

施工に際しては，圧送性の確認として，目視にて圧送圧力，ホースの脈動，ノズルからの吐出し具合を確認した。また，吐出量については吹付け機の吐出量設定値と口元からの実吐出量（1 バッチのコンクリートがノズルから出始めてから出なくなるまでの時間により算出）を測定して比較した。目視での確認結果および吐出量の比較結果を表 17 に示す。目視観察の結果からは OPC と HFSC 吹付けコンクリートに顕著な違いは見られなかった。また，試験位置の配置から，コン

クリートおよび急結剤の圧送距離は表 18 に示すように，HFSC の方が大きくなっているが，各配合ともに良好に吹付け施工が実施できた。吐出量については、②OPC-1 で，設定値と口元での吐出量に差が見られたが，目視観察の結果から圧送性に問題があるとは考えにくく，設定値の誤表示の可能性などが考えられる。以上のことから，HFSC 吹付けコンクリートは OPC 吹付けコンクリートと同等の圧送性を示すことが確認された。

表 17　目視確認結果と吐出量

試験位置	目視観察			コンクリート吐出量(m³)	
	圧送圧力	ホースの脈動	吹出し口からの吐出し具合	吐出量設定値(m³/h)	実吐出量(m³/h)
① OPC-2	常時安定しており，大きな変動は見られない。	大きな脈動は見られない。	吹付機の動きに併せて吐出しされている。良好。	8.5	9.3 (1.4m³/9min)
② OPC-1	常時安定しており，大きな変動は見られない。	大きな脈動は見られない。	吹付機の動きに併せて吐出しされている。良好。	13.0	6.0 (2.0m³/20min)
③ HFSC-1	常時安定しており，大きな変動は見られない。	大きな脈動は見られない。	吹付機の動きに併せて吐出しされている。良好。	8.0	7.5 (1.5m³/12min)
④ HFSC-2	常時安定しており，大きな変動は見られない。	大きな脈動は見られない。	安定して吐出しされている。良好。	9.1	10 (2.0m³/12min)

表 18　圧送距離

試験位置	コンクリート圧送距離(m)	急結剤圧送距離(m)
① OPC-2	23	24
② OPC-1	46	36
③ HFSC-1	48	35
④ HFSC-2	70	41

4.2.3 はね返り率

吹付けコンクリートのはね返り率は，吹付けコンクリートの配合以外に，急結剤の添加率，コンクリート吐出量のほか，ノズルの長さ，吹付け面までの距離，吹付け面とノズルの角度など複数の要因の影響を受けるため，一概に比較することは難しいが，OPC と HFSC 吹付けコンクリートの施工性の定性的な比較のために実施した。

表 19 にはね返り率測定の結果を示す。比較のため地上試験の結果も併せて示した。地上での結果よりも大きめの数値となっているが，これは地上試験では，横方向への吹付けのみだったのに対し，地下での施工では上方向への吹付けが多いことなど，上記の様々な要因が影響していると考えられる。

HFSC と OPC を比較すると，HFSC の方が小さい値を示しており，付着性に優れていることが示唆される。一般的に，リバウンド量は単位セメント量が多いほど小さく，また，SF の添加率が増すほど，はね返り率が低減するとの報告[15]もあり，今回の結果と整合している。

表 19　はね返り率

試験位置	単位粉体量(kg/m³)	吹付量(m³)	付着吹付量(m³)	リバウンド(m³)	はね返り率(%)	地上試験結果(%)
① OPC-2	400	3.5	2.5	1.0	28.6	―
② OPC-1		4.5	2.8	1.7	37.8	23.9
③ HFSC-1	500 (OPC+SF+FA)	4.0	3.1	0.9	22.5	13.3
④ HFSC-2		4.0	2.8	1.2	30.0	―

4.2.4 粉じん濃度

粉じん濃度は，「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」（平成 20 年 3 月 1 日改正）を参考に，切羽より 10m 後方の右，中央，左の 3 カ所において，胸の高さで測定した。測定時間は吹付け作業時間の関係から 3 分/箇所とした。表 20 に測定結果を，図 19 に測定器を示す。なお，吹付け作業前の粉じん濃度は 0mg/m³ であった。測定結果は HFSC 吹付けコンクリートの方が粉じんが少なく，目視においても粉じん発生量が少ないことが確認された。これ

は，前述のはね返り率が低い事とも整合している。

表 20　粉じん濃度

試験位置		粉じん濃度(mg/m³)	温度(°C)	湿度(%)	測定時間	測定器
①	OPC-2	24	11.0	68	3 分/箇所	LD-3K2 柴田科学(株)
②	OPC-1	16	14.1	66		
③	HFSC-1	16	16.8	77		
④	HFSC-2	5	19.0	76		

図 19　粉じん濃度測定器(LD-3K2)
柴田科学(株)HP(http://www.sibata.co.jp/)より

4.2.5 急結剤添加率

急結剤の添加率は，練り上がり温度や練り置き時間などのフレッシュコンクリートの性状，天端部か脚部かなどの施工箇所によって変動する。一般に，添加率を増すと付着効果が向上し，短時間での強度発現が良好となる反面，材齢 7 日以上の強度発現を阻害する可能性がある。通常，急結剤の添加率は，メーカーが単位セメント量（結合材量）に対して設定した推奨値を示している。

本施工試験においては，急結剤タンク容量の減量および事前に校正した急結剤供給装置の設定値の比較を実施した。表 21 に示した結果から，HFSC と OPC に顕著な違いは見られず，HFSC 吹付けコンクリートの施工においても，特別な措置を講じる必要はなく，通常の施工と同様の添加率管理で良いと考えられる。

表 21　急結剤添加率

試験位置		急結剤添加率(%)		推奨添加率(%)
		急結剤タンクの減量	急結剤添加装置設定値	
①	OPC-2	10.7	10.5	10
②	OPC-1	11.1	12.0	
③	HFSC-1	11.1	11.0	
④	HFSC-2	11.3	12.0	

急結剤：ナトミック type-10

4.2.6 施工性

吹付けコンクリートの施工性については，定量的な評価が難しいことから，表 22 に示した評価項目について，目視観察を行い，結果を 5 点満点で採点する方法で行った。観察結果を表 23 に示す。比較のため，通常の施工部分に用いられた高炉セメント（B 種）（以下，BB）の結果も示した。

表 22　吹付け施工性評価項目

評価項目	目視評価点数 1	2	3	4	5	評価基準など
混合状態	悪い		普通		良い	ノズルから吐出後のコンクリートと急結剤の混合状態について評価する。白い筋が見られると良い状態とは言えない。
脈動状態	激しい		普通		なし	マテリアルホースの脈動，あばれについて評価する。管内の付着物の増加や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条ととらえられる。
ノズルだれ	多い		普通		少ない	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	遅い		普通		急結	壁面付着後の急結状態を評価する。基本的に吹付け後の触指で判断する。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	多い		普通		少ない	粉じんの多少を判断する。これまでの実績に対し，OPC，HFSC の相対的比較で判断する。
付着状態	悪い		普通		良い	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する。但し，付着状態の良否には急結性の判断は含まれない。

表 23　施工性評価結果

評価項目	OPC-2	OPC-1	HFSC-1	HFSC-2	BB
混合状態	―	4	4	4	4
脈動状態	―	4	4	3	4
ノズルだれ	―	4	3	4	4
急結状態	―	3	4	4	3
粉じん	―	3	4	4	3.5
付着状態	―	3	4	4	3

施工性の評価結果から，OPC と HFSC に顕著な違いはなく，また BB と比較しても概ね同等の結果が得られた。特に，急結状態，粉じん，付着状態については，OPC および BB よりも HFSC の方が優れている傾向が見られた。これは，FA を多く含むことから HFSC の流動性がよいこと，はね返り率や粉じん濃度の測定結果とも整合している。

また，吹付け面の目視観察を実施した結果，OPC および HFSC ともに顕著な乱れ，ダレや凹凸は見られず，均一な仕上がりであり，HFSC が OPC に比べて色が青みを帯びている以外には，仕上がりとして両者の違いは確認されなかった。HFSC は FA を多く含むために OPC よりも青みを帯びたと考えられる。

4.3 硬化コンクリートの品質確認

硬化コンクリートの品質は表 14 に示すように，初期強度，圧縮強度およびコア強度の各種強度試験および気泡観察によって確認した。以下に，強度試験と気泡観察の結果に分けて記述する。

4.3.1 強度試験

強度試験の結果をまとめて表 24 に示す。比較として，地下施設工事（第 I 期工事）で施工した BB を用いた吹付けコンクリートの結果についても，直近の 3 回分の強度試験の結果を示した。なお，BB は材齢 91 日での試験は実施していない。

OPC および HFSC 吹付けコンクリートのいずれも，テストピースおよびコアで材齢 28 日において設計基準強度を上まわる結果を示しており，強度面からも施工上問題のないことが示された。

表 24　強度試験結果

試験位置		採取日	No.	圧縮強度(N/mm²) 初期強度 σ3h	σ24h	テストピース σ7	σ28	σ91	コア σ28
①	OPC-2	H21.4.14	1	2.3	15.5	43.0	61.6	58.3	42.5
			2	2.1	16.0	44.1	59.0	57.6	43.4
			3	1.8	14.0	40.7	62.1	59.2	40.1
			Ave.	2.1	15.2	42.6	60.9	58.4	42.0
②	OPC-1	H21.5.12	1	2.5	17.5	41.0	55.0	60.1	36.9
			2	2.2	21.1	38.5	53.5	62.5	36.1
			3	2.0	15.5	37.7	57.0	63.3	38.5
			Ave.	2.2	18.0	39.1	55.2	62.0	37.2
③	HFSC-1	H21.6.10	1	5.1	20.6	34.0	59.8	69.8	44.8
			2	5.6	18.0	33.9	61.6	66.8	47.7
			3	4.6	48.5	31.1	61.6	70.5	41.8
			Ave.	5.1	29.0	33.0	61.0	69.0	44.8
④	HFSC-2	H21.6.25	1	3.6	14.1	32.7	53.0	64.9	38.1
			2	3.8	15.1	31.3	52.2	67.2	39.1
			3	3.5	15.5	31.8	50.8	62.4	41.6
			Ave.	3.6	14.9	31.9	52.0	64.8	39.6
BB		H20.7.17	1	3.3	14.3	28.4	55.5	-	51.9
			2	3.1	13.3	28.5	55.0	-	51.4
			3	3.5	13.6	29.2	55.8	-	49.9
			Ave.	3.6	13.7	28.7	55.4	-	51.1
		H20.9.9	1	3.9	13.9	35.7	57.6	-	47.4
			2	3.8	13.1	34.1	57.0	-	44.8
			3	3.6	13.6	34.9	58.3	-	45.8
			Ave.	3.8	13.5	34.9	57.6	-	46.0
		H20.12.9	1	2.1	10.3	26.0	50.9	-	42.8
			2	2.2	11.2	25.2	49.7	-	38.7
			3	2.6	10.9	25.7	49.7	-	39.7
			Ave.	2.3	10.8	25.6	50.1	-	40.4
管理値*		-	-	1.5	5.0	-	36.0	-	36.0

*：管理値は OPC および HFSC に適用。

(1) 材齢と圧縮強度

初期強度およびテストピースによる圧縮強度の試験結果を図 20 に示す。材齢 3 時間および 24 時間における強度は OPC と HFSC で顕著な差は認められないが，材齢 7 日において OPC の強度増加が著しいことが分かる。これは，HFSC は OPC よりも単位セメント量が少ない（40wt%）事が影響していると考えられる。また，材齢 7 日では，HFSC に比べて OPC の強度が高くなっているが，材齢 28 日でほぼ同等，材齢 91 日では HFSC の強度が高くなっている。一般に FA や SF などのポゾラン材料を含むセメントは材齢に対する強度の増加が OPC よりも大きいとされており，今回の結果と整合している。

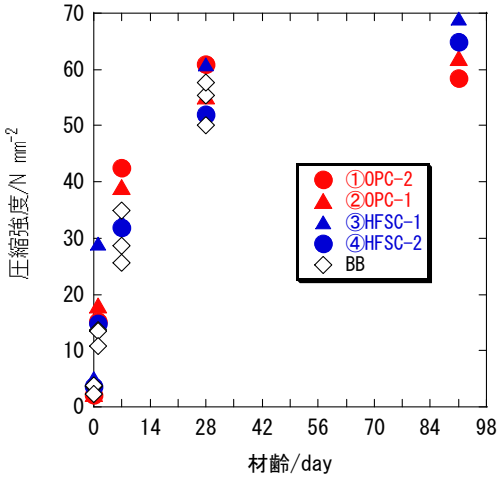


図 20　圧縮強度の経時変化

(2) テストピース強度とコア強度

表 24 に示したコアの圧縮強度は同材齢のテストピースのものと比較して小さくなる傾向にある。そこで，コア強度比 $= \frac{\text{コア強度}}{\text{テストピース強度}}$ と定義して OPC と HFSC を比較した結果を表 25 に示す。このコア強度比は，急結剤の添加による強度低下の要因として，吹付け作業時の急結剤の混入状態や，コア採取・作成時の欠損，骨材のばらつきなどが加味された結果である。

吹付けコンクリート用の急結剤の材料としての品質規格では，急結剤を添加したモルタルの材齢 28 日の強度はベースモルタルの材齢 28 日強度に対して 75%以上であることが土木学会で規定されている（JSCE-D 102-2005）。

今回の試験結果は土木学会規準とは条件が多少異なり，サンプル数は少ないものの，HFSC の方が OPC に比べて強度低下が少なく，コア強度比も 75%程度の値を示していることから，急結剤との相性，吹付け作業時の混入状態などに問題が無いことが示唆される。

表 25　コア強度比の比較

試験位置		コア強度(N/mm²)	テストピース強度(N/mm²)	コア強度比
①	OPC-2	42.0	60.9	0.690
②	OPC-1	37.2	55.2	0.674
③	HFSC-1	44.8	61.0	0.734
④	HFSC-2	39.6	52.0	0.762
BB		51.1	55.4	0.922
		46.0	57.6	0.799
		40.4	50.1	0.806

(3) 単位体積重量の比較

圧縮強度試験で使用した供試体（テストピースおよびコア）の重量から，単位体積重量を算出した結果を

表 26 に示す。また，配合から計算される単位体積重量（理論値）を表 27 に示す。

テストピースと理論値の単位体積重量は多少の差があるものの，混入空気量の違いによる差違を考慮すると，すべての配合で概ね同等の値を示している。コアから算出した値は，OPC および BB では理論値とほぼ同等であるのに対し，HFSC では理論値よりもコアの方が単位体積重量の大きい傾向が見られる。これは HFSC では吹付けによって密実なコンクリートが施工されたことを示唆しており，後述の気泡観察の結果とも整合している。

表 26　単位体積重量の比較

試験位置			平均重量(kg)	供試体体積(m^3)	単位体積重量(t/m^3)
コア	①	OPC-2	0.476	1.964×10^{-4} (ϕ50mm x 100mm)	2.42
	②	OPC-1	0.473		2.41
	③	HFSC-1	0.491		2.50
	④	HFSC-2	0.489		2.49
	BB		0.514		2.62
			0.496		2.53
			0.465		2.37
テストピース	①	OPC-2	3.773	1.571×10^{-3} (ϕ100mm x 200mm)	2.40
	②	OPC-1	3.813		2.43
	③	HFSC-1	3.663		2.33
	④	HFSC-2	3.071		2.36
	BB		3.773		2.40
			3.833		2.44
			3.753		2.39

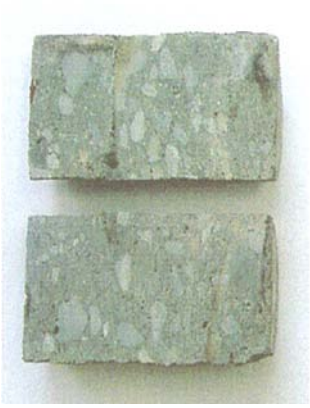
表 27　単位体積重量（理論値）

配合	単位量(kg/m^3)							単位体積重量 (t/m^3)
	水	結合材			細骨材	粗骨材	混和剤	
		セメント	SF	FA				
OPC	173	400	-	-	1,068	806	2.00	2.45
HFSC	150	200	100	200	974	655	3.25	2.28
BB	170	400	-	25	804	1,035	2.00	2.44

4.3.2 気泡観察

前述のコア強度試験で使用したコアを軸方向に切断して，切断面を観察した。図 21 に切断面の状況を示す。HFSC の方が OPC に比べて，気泡が少なく密実であることが肉眼でも確認できた。

OPC



HFSC

図 21　コア切断面

5. まとめ

平成 21 年度に幌延の地下施設で実施した，低アルカリ性セメント（HFSC）の吹付け施工試験について，普通ポルトランドセメント（OPC）との比較を通じて，得られた知見および課題を以下に示す。

- 現地のバッチャープラントを用いて，要求性能を満足する HFSC を製造することが可能である。
- HFSC を用いた吹付けコンクリートは，従来の材料（OPC）と比較して，施工性に問題はなく，リバウンド量，粉じん濃度が少なく，施工性に優れている。
- HFSC を用いた吹付けコンクリートは，設計基準強度を十分に満足し，強度のばらつきも少ない。
- 今回の試験施工では，シリカフューム（SF）を人力による投入にて HFSC を製造した。今後，施工の規模が大きくなった場合や処分場での使用などを想定した場合，HFSC を製造できるバッチャープラントを整備し，安定的に HFSC が供給できることを確認する必要がある。
- 処分場への適用を考えた場合，施工場所によって吹付けコンクリートだけではなく，覆工やグラウトとして低アルカリ性セメント系材料が要求されることも考えられるため，覆工コンクリートやグラウト材料としての適用性についても確認する必要がある。

また，HFSC は施工実績がこれまでほとんど無かった事から，今後も試験施工を実施し，施工実績を蓄積することが重要である。さらに，施工後に周辺岩盤および地下水に与える影響を把握するための化学分析などを継続的に実施し，データを蓄積していくことが重要と考える。

参考文献

1) 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－　分冊 2　工学技術の開発”，JNC TN1400 2005-015，(2005).

2) 原子力発電環境整備機構:“高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性”, NUMO-TR-04-01, (2004).

3) Cama J., Ganor J., Ayora C., Lasaga A.：“Smectite dissolution kinetics at 80°C and pH 8.8”, Geohim. Cosmochim. Acta, 64, pp.2701-2717, (2000).

4)大和田仁，三原守弘，黒木泰貴，有本邦重：“アルカリ溶液中での花崗岩の変質挙動”，JNC TN8400 2000-027，(2000).

5) 土木学会：“高レベル放射性廃棄物地層処分の現状とさらなる信頼性向上に向けて”，(2004).

6) 三原守弘，入矢桂史郎：“放射性廃棄物処分場用セメント系材料”，特許公報，第 2941269 号，(1999).

7) 日本コンクリート工学協会：“コンクリート便覧[第二版]”，(1996).

8) 大和田仁，三原守弘，入矢桂史郎，松井淳：“放射性廃棄物地層処分システムにおけるセメント系材料の検討－浸出液の pH を低くしたセメント系材料の施工性と機械的特性－”，JNC TN8400 99-057, (2000).

9) 入矢桂史郎，三原守弘，：“ポゾラン材料を高含有した低アルカリ性コンクリートの開発”，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25, No.1, pp.185-190, (2003).

10) 藤田朝雄，谷口直樹，松井裕哉，棚井憲治，西村繭果，小林保之，平本正行，前川恵輔，澤田淳，牧野仁史，笹本広，吉川英樹，柴田雅博，若杉圭一郎，濱克宏，操上広志，國丸貴紀，石井英一，竹内竜史，中野勝志，太田久仁雄，瀬尾俊弘，宮原要，内藤守正，油井三和：“幌延深地層研究計画における地上からの調査段階（第 1 段階）研究成果報告書　分冊「地層処分研究開発」”，JAEA-Research 2007-045，(2007).

11) 入矢桂史郎，三上哲司，竹田宣典，秋好賢治，納多勝：“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(III)”，JNC TJ5400 2003-002, (2003).

12) 入矢桂史郎，田島孝敏，納多勝：“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 2003-008, (2004).

13) 松田武，納多勝，入矢桂史郎，小西一寛，中山雅，小林保之，“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”，JAEA-Research 2007-089, (2008).

14) 小林保之，山田勉，中山雅，松井裕哉，松田武，小西一寛，入矢桂史郎，納多勝：“低アルカリ性セメントを用いたコンクリートに関する原位置試験計画案”，JAEA-Review 2007-007, (2007).

15) 社団法人日本トンネル技術協会：“トンネルの吹付けコンクリート”，平成 8 年 2 月，(1996).

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
体積	立法メートル	m^3
速さ，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	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方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
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の） 1	1
比透磁率[b]	（数字の） 1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表される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	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
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[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。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である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含む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	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ sA$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

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}	エクサ	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}	ゼプト	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

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=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=1l=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、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 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}\ J$
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St\ =1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal\ =1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G\ =1Mx\ cm^{-2}\ =10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています