

光ファイバ式ひび割れ検知センサの
安全確保技術としての適用性に関する研究
(平成 27 年度～平成 30 年度)
(共同研究)

Study on the Applicability of the Fiber-optic Crack Detection Sensor
as a Safety Technology (FY2015–FY2018)
(Joint Research)

河野 勝 葉山 和則 松井 裕哉 尾崎 裕介

Masaru KONO, Kazunori HAYAMA, Hiroya MATSUI and Yusuke OZAKI

核燃料・バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター
地層科学研究部

Geoscientific Research Department
Tono Geoscience Center

Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

July 2019

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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 (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, 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

光ファイバ式ひび割れ検知センサの安全確保技術としての適用性に関する研究
(平成 27 年度～平成 30 年度)
(共同研究)

日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター 地層科学研究部

河野 勝^{*1}、葉山 和則^{*1}、松井 裕哉、尾崎 裕介

(2019 年 5 月 27 日受理)

日本原子力研究開発機構は、地層処分のための技術基盤の整備を主たる目標として、瑞浪超深地層研究所および幌延深地層研究センターにおいて地下施設の建設に伴う研究プロジェクトを推進している。

本共同研究では、操業時の空洞安定性等に影響を及ぼす可能性のある支保工のひび割れ発生を迅速に検知する技術として、株式会社東京測器研究所（以下、TML と称す）の光ファイバ式ひび割れ検知センサをとりあげた。本センサが、数十年間の長期的な安全確保技術として有効に機能しうるかに関する検証を行うことを主目的として、平成 22 年度（2010 年度）から平成 26 年度（2014 年度）まで実施していた TML との共同研究を継続し、瑞浪超深地層研究所において、原位置での長期耐久性試験を実施した。この試験の結果、光ファイバ式ひび割れ検知センサシステムに関する地下坑道内での長期計測システムとしての適用性やその維持管理方法を実証的に確認したと同時に、今後の課題も明らかにした。

本研究は、日本原子力研究開発機構と株式会社東京測器研究所との共同研究として実施したものである。

東濃地科学センター：〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64

*1 株式会社東京測器研究所

**Study on the Applicability of the Fiber-optic Crack Detection Sensor
as a Safety Technology (FY2015–FY2018)
(Joint Research)**

Masaru KONO^{*1}, Kazunori HAYAMA^{*1}, Hiroya MATSUI and Yusuke OZAKI

Geoscientific Research Department, Tono Geoscience Center,
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development,
Japan Atomic Energy Agency
Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received May, 27, 2019)

Japan Atomic Energy Agency (hereinafter referred to as JAEA) has been conducted a geoscientific research and development project to establish the scientific and technological basis for geological disposal at the Mizunami Underground Research Laboratory and the Horonobe Underground Research Center.

In a collaborative research with Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd. (hereinafter referred to as TML) performed between FY 2010 and FY 2014, we focused on the fiber-optic crack detection sensor developed by TML as a method to detect cracks in the support system that may affect the stability of rock cavern during the operation. With an aim to demonstrate long-term safety performance of the sensor for decades, the collaborative research continued and the evaluation tests of the long-term durability of the fiber-optic crack detection sensor were conducted from FY 2015 to FY 2018 at the Mizunami Underground Research Laboratory. As a result, we confirmed that the measurement system using the fiber-optic crack detection sensor is applicable to long-term measurement in deep underground area, also identified the future tasks.

Keywords : Fiber-optic Crack Detection Sensor, Evaluation Test of Long-term Durability,
Performance Evaluation Test

This work has been performed in JAEA as a joint research with Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd

^{*1} Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd

目 次

1. はじめに	1
2. 研究内容	2
3. 光ファイバ式ひび割れ検知センサシステム	3
3.1 光ファイバ式ひび割れ検知センサ	3
3.2 光ファイバ式ひび割れ検知センサの設置位置	4
3.3 計測機器の設置数量	5
3.4 接着剤の選定	7
4. 健全度の評価方法	8
5. 長期耐久性確認試験結果	11
5.1 各設置箇所における環境変化	11
5.2 光ファイバ式ひび割れ検知センサの計測システムとしての健全性	12
6. まとめ	17
参考文献	17
付録 長期耐久性確認試験 確認作業結果	19

Contents

1. Introduction	1
2. Overview of the collaborative research from FY 2015 to FY 2018	2
3. Fiber-optic crack detection sensor system	3
3.1 Fiber-optic crack detection sensor	3
3.2 Measurement point of the fiber-optic crack detection sensor	4
3.3 Testing configuration of each measurement points	5
3.4 Adhesives	7
4. Methods of soundness evaluation	8
5. Evaluation test result of the long-term durability of the fiber-optic crack detection sensor	11
5.1 Environmental changes at each measurement point.....	11
5.2 Long-term durability of the measurement system using of the fiber-optic crack detection sensor	12
6. Concluding remarks	17
Reference	17
Appendix: Data sheets on Evaluation test of long-term durability	19

図および写真リスト

図 3.1	光ファイバ式ひび割れ検知センサ KZCA-500A 外観図.....	3
図 3.2	光ファイバ式ひび割れ検知センサの設置位置概要	4
図 3.3	1 箇所あたりのセンサ設置概要図.....	5
図 3.4	Onset 社製温湿度データロガーHOBOProV2	5
図 3.5	計測機器の設置状況例 (立坑間(避難所)計測点)	6
図 4.1	ハンドヘルドデータロガーTC-32K の外観.....	8
図 4.2	健全性が損なわれた場合の原因究明フロー図	10
図 5.1	各計測点における温度の経時変化	11
図 5.2	各計測点における湿度の経時変化	11
写真 5.1	光ファイバセンサ部の剥離状況の例(2015 年 8 月 4 日、換気立坑付近計測点)	12
写真 5.2	PS 接着箇所の剥離部分の拡大写真(2015 年 8 月 4 日、換気立坑付近計測点)	13
写真 5.3	EB-2 接着箇所の剥離部分の拡大写真(2015 年 8 月 4 日、換気立坑付近計測点)	14
写真 5.4	光ファイバセンサ部の剥離状況の例(2015 年 8 月 4 日、立坑間(避難所)計測点) ..	15
写真 5.5	PS 接着箇所の剥離部分の拡大写真(2015 年 8 月 4 日、立坑間(避難所)計測点) ...	15
写真 5.6	光ファイバセンサ部の剥離状況の例(2015 年 10 月 26 日、主立坑付近計測点)	16
写真 5.7	PS 接着箇所の剥離部分の拡大写真(2015 年 10 月 26 日、主立坑付近計測点)	16

表リスト

表 3.1	光ファイバ式ひび割れ検知センサ KZCA-500A 仕様	3
表 3.2	Onset 社製温湿度データロガーHOBOProV2 の仕様.....	6
表 3.3	光ファイバ式ひび割れ検知センサ、検証用ひずみ出力センサおよび温湿度データロガー の設置数量内訳表	7
表 3.4	接着剤の種類と主な特徴	7
表 4.1	ハンドヘルドデータロガーTC-32K の仕様.....	9
表 4.2	光ファイバ式ひび割れ検知システムの健全度検証項目一覧表.....	9
表 4.3	光ファイバ導通チェックの仕様および外観	10

This is a blank page.

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）は、地層処分のための技術基盤の整備を主たる目標として、瑞浪超深地層研究所および幌延深地層研究センターにおいて地下施設の建設に伴う研究プロジェクトを推進している。これらのプロジェクトでは、大深度の地下施設の設計・建設・操業に必要な技術の有効性確認を深地層の工学技術に関する研究として実施している。原子力機構と株式会社東京測器研究所（以下、TML）との共同研究は、工学技術に関する設計・施工計画技術、掘削技術、施工対策技術および安全を確保する技術に関する研究のうち、安全を確保する技術の有効性確認を主たる課題として開始したものであり、瑞浪超深地層研究所では 2010 年度から、幌延深地層研究センターでは 2014 年度から、それぞれの研究坑道を利用した試験を実施していた¹⁾。

本報告書は、平成 27 年度以降も本共同研究として継続実施していた、瑞浪超深地層研究所における「光ファイバ式ひび割れ検知センサおよび支保工接着部の長期耐久性確認試験」で得られた結果を取りまとめたものである。

2. 研究内容

本共同研究で使用した TML 製光ファイバ式ひび割れ検知センサは、地上構造物に対しての適用事例はあったものの、地下構造物に対しての適用実績はなかった。このセンサは、対象物にひび割れが入った場合、それによって光ファイバも切断され、遠方からもひび割れ箇所を視認可能であることが特徴である。光ファイバ式センサ自体は相対的に長期耐久性を有するが、その一方で、構造物に直接接着し使用する計測システムであるため、利用に際しては、センサ接着部の長期健全性が不可欠となる。

一方、高レベル放射性廃棄物の地層処分場のような非常に大規模な地下構造物では、地上と地下での環境の違いのみならず、設置場所によっても環境が大きく異なる可能性があり、接着部の耐久性は異なる環境条件では同一でない可能性も考えられた。

これらを踏まえ、平成 22 年度から実施していた共同研究を継続し、瑞浪超深地層研究所研究坑道内で環境条件が異なる計測点 3 箇所に設置した光ファイバ式ひび割れ検知センサ計測システムの長期耐久性についての観測を続けることにより検証した。

3. 光ファイバ式ひび割れ検知センサシステム

3.1 光ファイバ式ひび割れ検知センサ¹⁾

同センサは、TML が各種コンクリート構造物の維持管理用ひび割れ検知を目的として開発した光ファイバ式のひび割れ検知センサである。センサの検知長内でひび割れが発生するとそこでファイバが切断され発光するため、従来の目視点検と比較して点検者の主観性に左右されることなく、支保工の変状に関する見落としなどを低減できる。図 3.1 に光ファイバ式ひび割れ検知センサ KZCA-500A の外観図を、表 3.1 に主な仕様を示す。

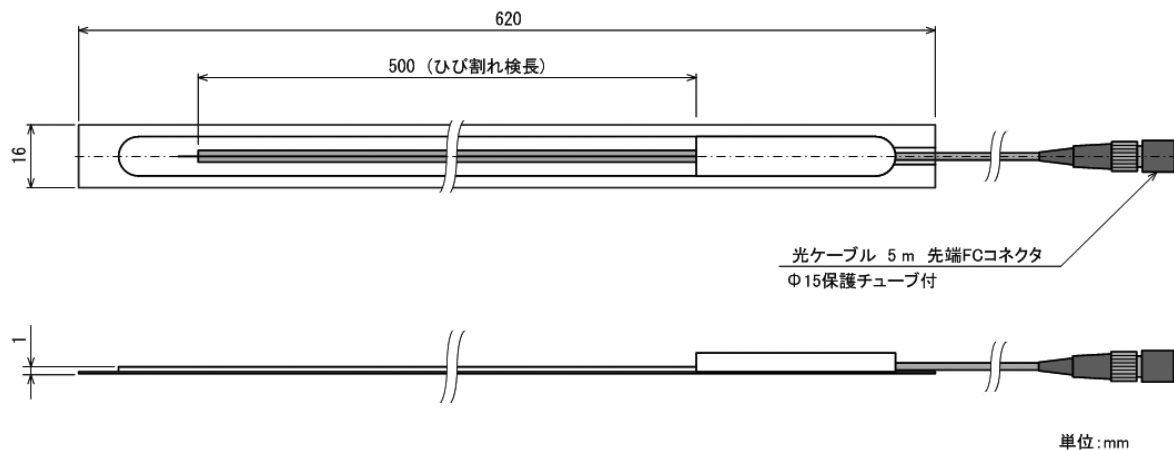


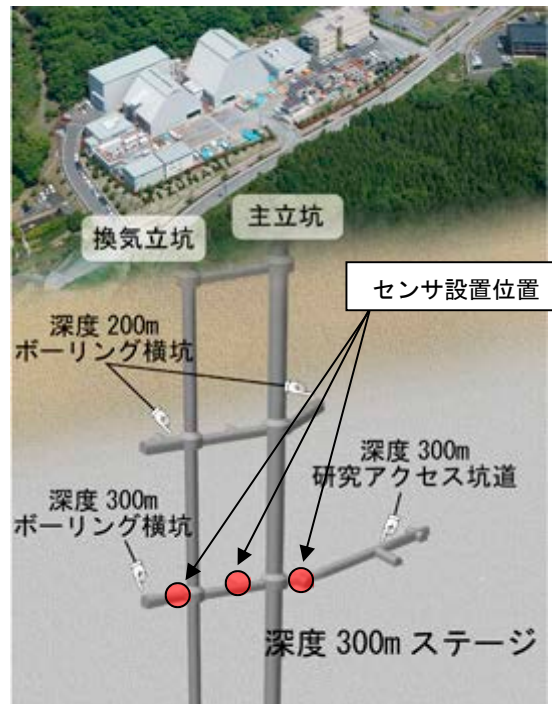
図 3.1 光ファイバ式ひび割れ検知センサ KZCA-500A 外観図¹⁾

表 3.1 光ファイバ式ひび割れ検知センサ KZCA-500A 仕様¹⁾

型名	KZCA-500A-010
検知長	500mm
測定対象	コンクリート表面
検知ひび割れ幅	0.1mm 以上
適用接着剤	EB-2、PS
許容温度範囲	-30 ～ +70℃
質量	約 15 g
保護等級	IP58 相当
入出力ケーブル	φ2 0.9mm 心線 5m FC コネクタ付コード保護チューブ付

3.2 光ファイバ式ひび割れ検知センサの設置位置¹⁾

光ファイバ式ひび割れ検知センサの設置箇所は、深度 300m ステージにある水平坑道内の環境条件（温度、湿度など）の異なる主立坑付近、換気立坑付近および立坑間（予備ステージ）の 3 箇所とし、それらの場所の吹付けコンクリート表面に設置した。設置は、吹付けコンクリート表面を削り、平滑化した上で実施した。図 3.2 に光ファイバ式ひび割れ検知センサの設置位置の概要図を示す。



- * センサ設置位置（図中●印）は、図中左より、換気立坑近傍計測点、立坑間（避難所）計測点および主立坑近傍計測点の 3 箇所

図 3.2 光ファイバ式ひび割れ検知センサの設置位置概要

3.3 計測機器の設置数量¹⁾

図 3.3 に、1 箇所あたりのセンサ設置状況の概要図を示す。同図に示したように、設置位置 1 箇所における光ファイバ式ひび割れ検知センサの設置数量は 2 台とし、それぞれ特性の異なる接着剤（PS 接着剤、EB-2 接着剤）で設置した。また、接着状況の変化を定量的に捉えるため、光ファイバ式ひび割れ検知センサとほぼ同質の材料を使用したひずみ出力の検証用センサをその近傍に 2 台/箇所設置した。従って、1 箇所あたりの設置台数は光ファイバ式ひび割れ検知センサ 2 台と検証用ひずみ出力センサ 2 台とし、合計数量として光ファイバ式ひび割れ検知センサを 6 台、検証用ひずみ出力センサを 6 台設置した。加えて、各箇所の環境条件を定量的に捉えるため、温湿度データロガー（図 3.4、表 3.2）を 1 台/箇所（合計 3 台）設置し、30 分毎の温度、湿度を記録した。

これらの設置状況の例を図 3.5 に、表 3.3 に光ファイバ式ひび割れ検知センサ、検証用ひずみ出力センサおよび温湿度データロガーの設置数量内訳表を示す。

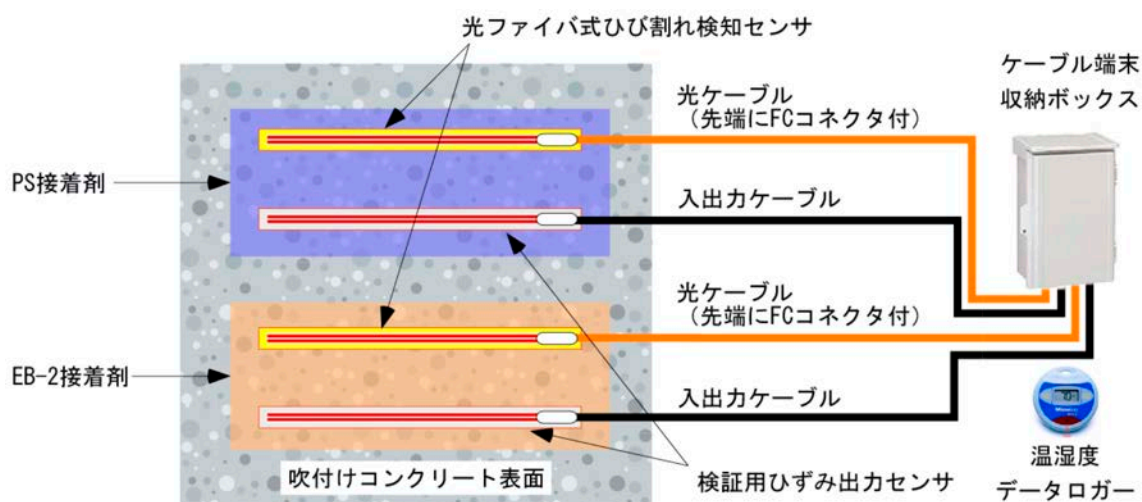


図 3.3 1 箇所あたりのセンサ設置概要図



図 3.4 Onset 社製温湿度データロガー-HOBOProV2¹⁾

表 3.2 Onset 社製温湿度データロガー-HOBOProV2 の仕様¹⁾

測定範囲	温度：－40℃～＋70℃ 湿度：0～100%
分解能	温度：±0.2℃ 湿度：±2.5%（10～90%）
メモリー数	42000 点
使用電源	3.6V リチウム電池 1 個
外形寸法	φ38×100mm
質量	約 57g

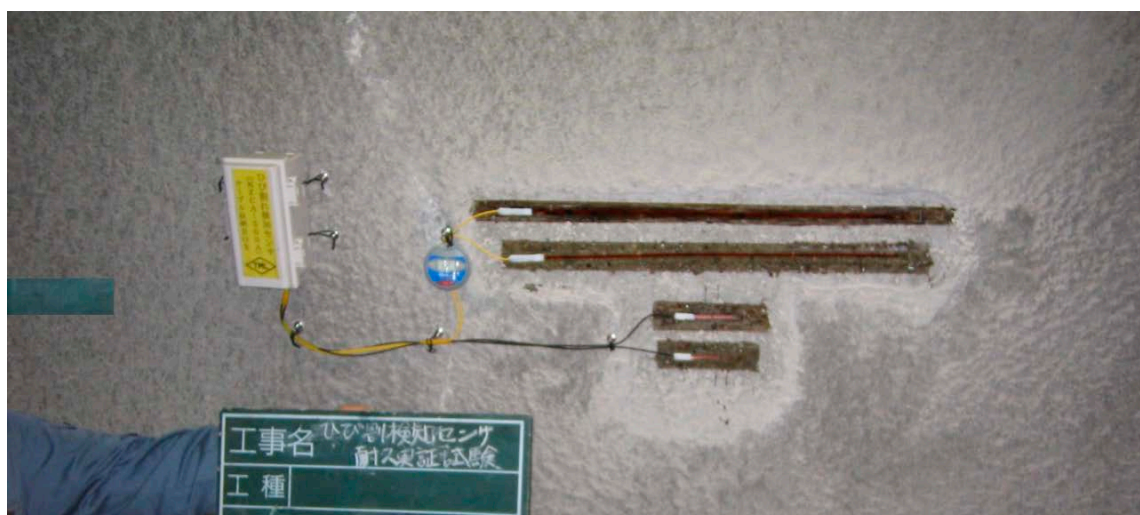
図 3.5 計測機器の設置状況例（立坑間（避難所）計測点）¹⁾

表 3.3 光ファイバ式ひび割れ検知センサ、検証用ひずみ出力センサおよび温湿度データロガーの設置数量内訳表¹⁾

設置箇所	センサ種類	型 名	数 量	備 考
換気立坑付近の 水平坑道の 吹付けコンクリート (計測点 1)	光ファイバ式 ひび割れ検知センサ	KZCA-500A	2 台	ケーブル 5m 付
	検証用ひずみ出力センサ	—	2 台	ケーブル 5m 付
	温湿度データロガー	HOBO proV2	1 台	
立坑間の (予備ステージ) 吹付けコンクリート (計測点 2)	光ファイバ式 ひび割れ検知センサ	KZCA-500A	2 台	ケーブル 5m 付
	検証用ひずみ出力センサ	—	2 台	ケーブル 5m 付
	温湿度データロガー	HOBO proV2	1 台	
主立坑付近の 水平坑道の 吹付けコンクリート (計測点 3)	光ファイバ式 ひび割れ検知センサ	KZCA-500A	2 台	ケーブル 5m 付
	検証用ひずみ出力センサ	—	2 台	ケーブル 5m 付
	温湿度データロガー	HOBO proV2	1 台	
合計数量	光ファイバ式ひび割れ検知センサ：6 台 検証用ひずみ出力センサ：6 台 温湿度データロガー：3 台			

3.4 接着剤の選定¹⁾

本試験では、センサ単体ではなく、吹付けコンクリートの接着面整形や接着剤を含めた計測システムとしての健全性を長期的に検証することを目的としていたため、光ファイバ式ひび割れ検知センサ等の接着には、一般にひずみゲージ接着用に使用され長期安定性に優れているとされる表 3.4 に示した 2 種類の接着剤を使用した。

表 3.4 接着剤の種類と主な特徴¹⁾

接着剤 の種類	主成分	使用温度範囲	硬化条件	メーカー	特徴
PS	ポリエステル	−30℃～ +100℃	室温で 2～3 時間	(株)東京測器研究所	コンクリート表面用の 代表的な接着剤で、高粘 度で壁面への施工に適 している。
EB-2	エポキシ	−60℃～ +200℃	室温で 24 時間	(株)東京測器研究所	常温硬化型のエポキシ 系の接着剤で接着力に 優れ、長期間の安定した 測定が可能。

4. 健全度の評価方法

参考文献 1)で示した試験の継続として、計測システムの健全度の評価方法は同じものを用いた。すなわち、実際の地下深部の坑道を利用した今回の耐久性実証試験では、センサ単体ではなく接着面の平滑整形処理や接着剤を含めた計測システムとしての健全性を長期的に検証することを目的としていたため、健全度評価の項目としては

- ① 光ファイバ式ひび割れ検知センサ単体の性能確認
- ② 接着剤との付着状況確認（光ファイバ式ひび割れ検知センサおよび吹付けコンクリート面）

の二つを設定した。

具体的には、①については目視による外観検査の他、光ファイバ導通チェッカ（光源）を接続して異常がない（設置直後の検査と同様にセンサ先端部が発光する）ことを確認し、②については目視による外観検査の他、ひび割れ検知センサと同じコーティング材を使用した検証用ひずみ出力センサを利用して、検査治具により接着の状況を定量的に捉えることとした。すなわち、定期的に行う耐久性確認時に検証用ひずみ出力センサのケーブル端末にハンドヘルドデータロガー（図 4.1、表 4.1）を接続して指示値を記録するとともに、検査治具による加圧前後の指示値を記録して変化がないこと、つまり、接着剤による接着状況が健全であることを確認する方法をとった。検証項目を表 4.2 に、健全性が損なわれた場合の原因究明フローを図 4.2 に示す。また、光ファイバ導通チェッカの外観および仕様を表 4.3 に示す。



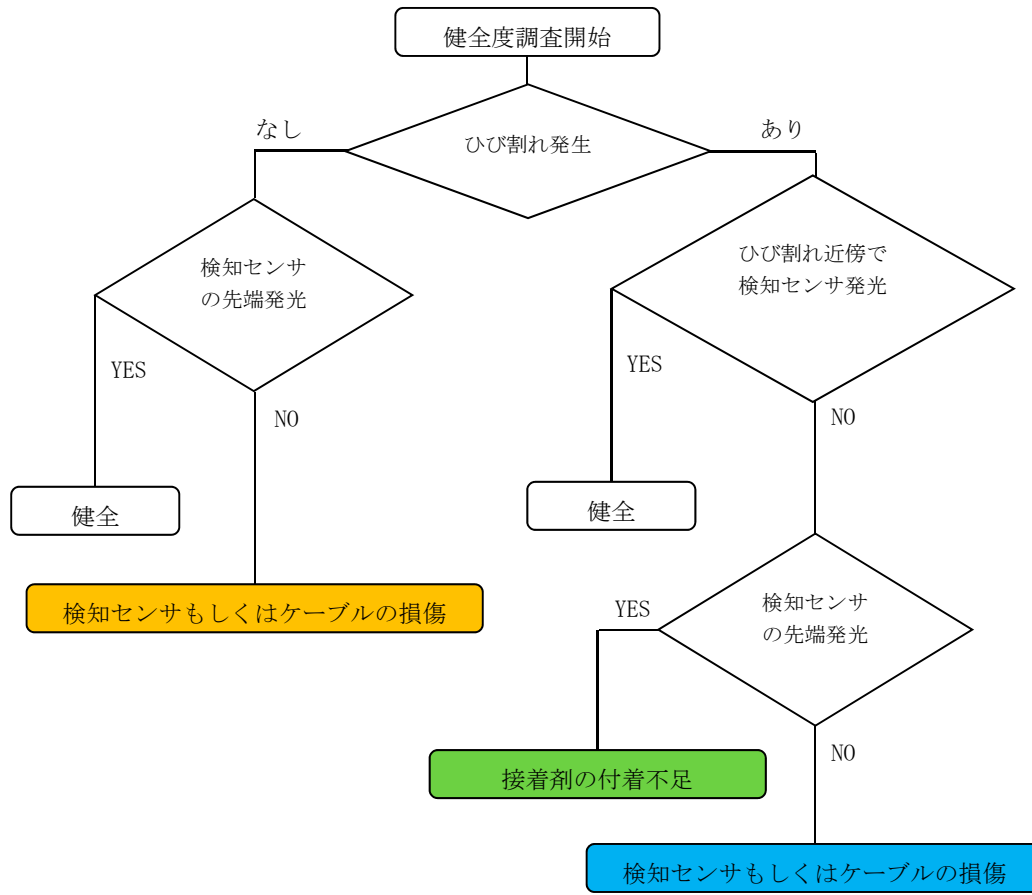
図 4.1 ハンドヘルドデータロガーTC-32K の外観¹⁾

表 4.1 ハンドヘルドデータロガーTC-32K の仕様¹⁾

測定点数	1 点
ひずみ測定	1 ゲージ 3 線式、1 ゲージ 4 線式、2 ゲージ法、4 ゲージ法 他
直流電圧測定	V1/1:±300mV、V1/100 : ±30V
熱電対温度測定	T、K、J、B、S、R、E、N、JIS C 1602-1995
電源	単 3 型アルカリ電池 4 本 (約 10 時間)、専用 AC アダプタ CR-1867
使用温湿度範囲	−10℃～+50℃ 85%RH 以下 (結露を除く)
外形寸法	102mm (W) ×49mm (H) ×223mm (D)
質量	約 800g

表 4.2 光ファイバ式ひび割れ検知システムの健全度検証項目一覧表¹⁾

検証項目	検証方法
光ファイバ式 ひび割れ検知センサ	①目視による外観検査 (コーティングの劣化状況などを確認)
	②光ファイバ導通チェッカによる検知部健全度確認 (センサ自体の劣化により亀裂などが生じ、センサ先端 以外から光が漏れていないことを確認)
接着剤	①目視による外観検査 (劣化により、センサやコンクリート面との剥離および ひび割れが生じていないことを確認)
	②検証用ひずみ出力センサによる接着状況の確認 (検査治具による加圧前後の指示値などにより、定量的に 接着状況の健全度を確認)



※ 健全度が損なわれた部位を上記フローにより推定し、原因を究明する。

図 4.2 健全性が損なわれた場合の原因究明フロー図¹⁾

表 4.3 光ファイバ導通チェッカの仕様および外観

型名	BML205-1
光出力（最大）	1mW 以下
レーザクラス および波光長	クラス 1 635～650nm
検出距離	5km
出力モード	連続/点滅（2Hz）
許容温度範囲	－10 ～ ＋50℃
アダプタ	FC、SC、ST
寸法	175×25mm
メーカー	OFW
外観	

5. 長期耐久性確認試験結果

長期耐久性確認試験は、参考文献 1)の期間では、2011 年 4 月から、約 3 ヶ月の間隔を置いて 2015 年 1 月まで計 16 回の健全度確認作業を実施した。本報告書では、平成 27 年度からの共同研究分となる、2015 年 4 月より 2019 年 1 月までの計 16 回の健全度の確認作業で得られた結果と知見を以降に述べる。また、全 16 回の確認作業結果の詳細は巻末に付録として記載した。

5.1 各設置箇所における環境変化

各計測点における温度と湿度の経時変化を図 5.1、図 5.2 に示す。換気立坑付近計測点は、2016 年 4 月 26 日の点検時にセンサ類を撤去したため、それ以降のデータは取得していない。

温度変化については、深度 300m 地点で夏季と冬季では 15℃程度の変動があるが、これは坑道内通気のため地上の外気を導入しているためである。3 つの計測点については、いずれも、夏季は計測期間中ほぼ同じ温度を示し 24℃程度で推移したが、冬季は、換気立坑近傍計測点と立坑間（避難所）計測点が、主立坑近傍計測点に比べ、最大 5℃程度低い傾向にあった。湿度は、いずれの設置場所もほぼ同等の値を示し、冬季は 70%、夏季は 100%の湿度で周期的に変化していた。

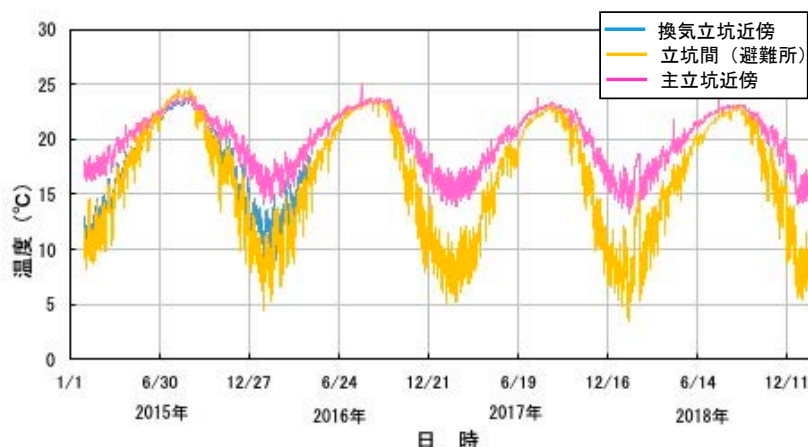


図 5.1 各計測点における温度の経時変化

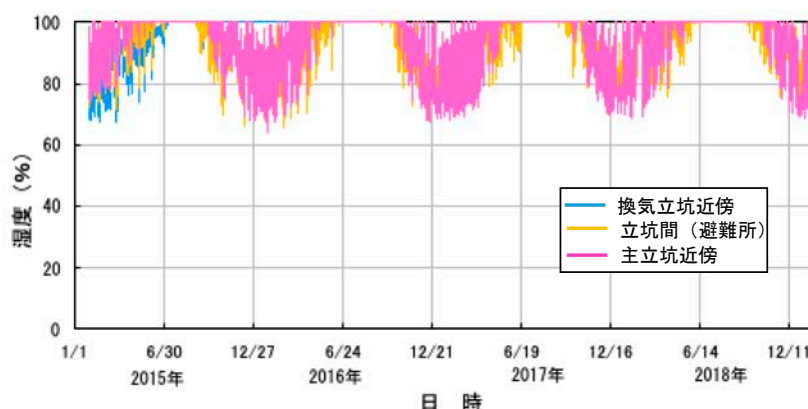


図 5.2 各計測点における湿度の経時変化

5.2 光ファイバ式ひび割れ検知センサの計測システムとしての健全性

2011 年 4 月から 2019 年 1 月まで実施していた耐久性試験の間には、参考文献 1) で示したそれ以前の結果と同様、設置した 3 箇所いずれも吹付コンクリート表面にひび割れは発生しなかったため、光ファイバセンサそのものへのダメージは認められなかった。

一方、計測システムとしての健全性に直結する接着面の健全性については、2015 年度からの本共同研究期間内では、2015 年 8 月 4 日の点検で、換気立坑付近計測点の PS 貼付箇所及び EB-2 貼付箇所（写真 5.1～写真 5.3）、立坑間（避難所）計測点の PS 貼付箇所（写真 5.4、写真 5.5）において剥離が確認され、2015 年 10 月 26 日の点検で主立坑付近計測点の PS 貼付箇所（写真 5.6、写真 5.7）において剥離が確認された。これは、年間を通じて高湿度（70%以上）環境のため、接着剤が吸湿しその線膨張特性が大きく変化したことが一つの要因と考えられる。

立坑間（避難所）計測点、主立坑付近計測点の EB-2 貼付箇所に関しては、接着部の健全性についても、目視による外観検査や可視光源（光ファイバ導通チェッカ）による判定からも、前回の共同研究開始時の 2011 年 4 月以降、ほぼ 8 年間にわたり健全な状態を維持していた。また、ひずみ出力の検証用センサによる検査治具での接着状況を定量的に判定した結果でも、EB-2 接着剤に関しては同様に健全な状態を維持していた。

ポリエステル系の PS 接着剤に比較し、エポキシ系の EB-2 接着剤は耐湿性に優れているが、写真 5.3 における剥離の原因としては、写真 5.1 に見られるような炭酸カルシウム溶液の吸湿や加水分解反応により、センサ上にエフロレッセンスが発生し剥離が生じたことが考えられる。

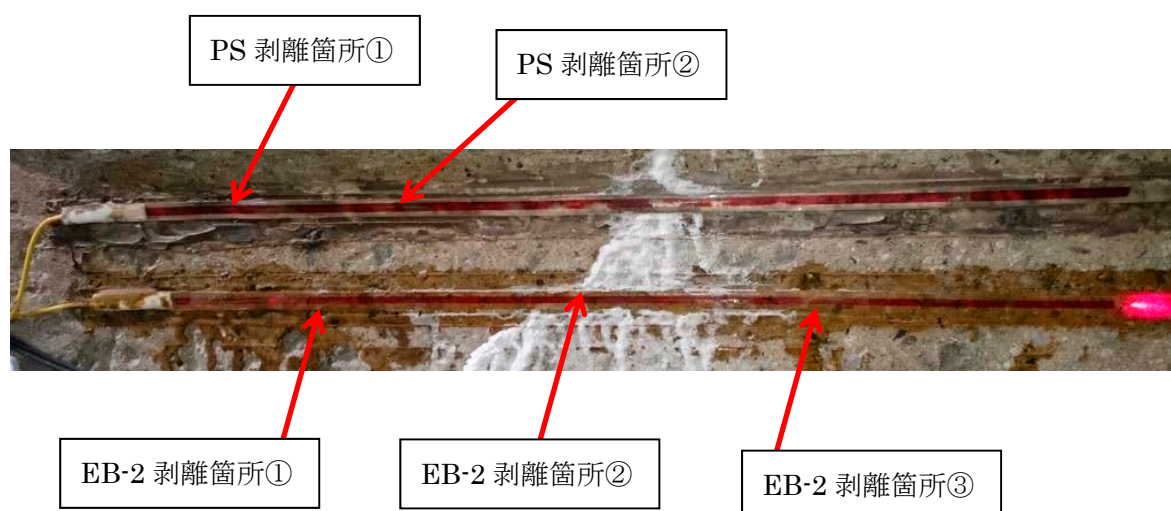


写真 5.1 光ファイバセンサ部の剥離状況の例
（2015 年 8 月 4 日、換気立坑付近計測点）

PS 剥離箇所①



PS 剥離箇所②

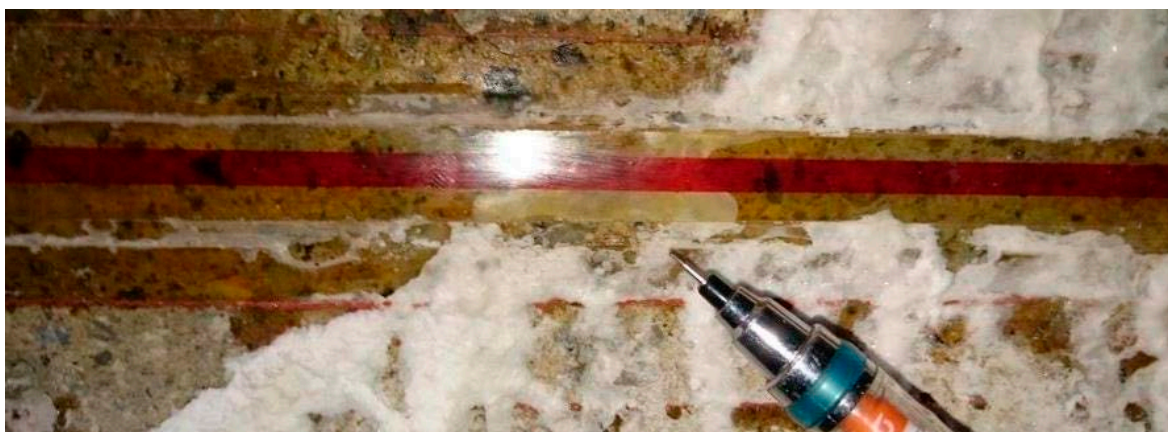


写真 5.2 PS 接着箇所の剥離部分の拡大写真
(2015 年 8 月 4 日、換気立坑付近計測点)

EB-2 剥離箇所①



EB-2 剥離箇所②



EB-2 剥離箇所③



写真 5.3 EB-2 接着箇所の剥離部分の拡大写真
(2015 年 8 月 4 日、換気立坑付近計測点)

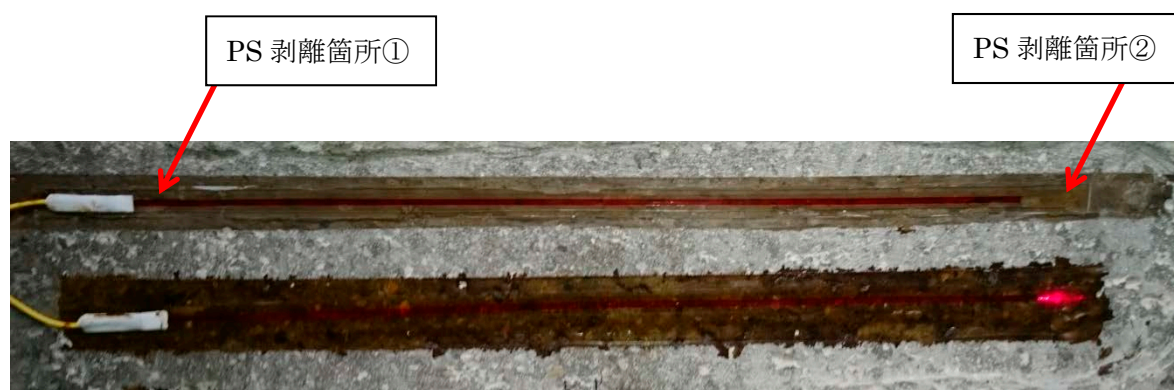


写真 5.4 光ファイバセンサ部の剥離状況の例
(2015 年 8 月 4 日、立坑間（避難所）計測点)



写真 5.5 PS 接着箇所の剥離部分の拡大写真
(2015 年 8 月 4 日、立坑間（避難所）計測点)

PS 剥離箇所①



写真 5.6 光ファイバセンサ部の剥離状況の例
(2015 年 10 月 26 日、主立坑付近計測点)

PS 剥離箇所①



写真 5.7 PS 接着箇所の剥離部分の拡大写真
(2015 年 10 月 26 日、主立坑付近計測点)

6. まとめ

光ファイバ式ひび割れ検知センサおよび支保工接着部の長期耐久性を検証するために、センサ自体の耐久性に加え、吹付けコンクリートの接着面整形や接着剤を含め、計測システムとしての妥当性の評価を 2010 年 12 月 12 日より開始した。

ポリエステル系接着剤 PS により設置した、ひび割れ検知センサが 2015 年 8 月 4 日の点検時に換気立坑付近計測点および立坑間（避難所）計測点で、2015 年 10 月 26 日の点検時に主立坑付近計測点で剥離が確認された。剥離の原因として年間を通じて高湿度（70%以上）の環境のため、接着剤が吸湿し線膨張が大きく変化したことが考えられる。

また、エポキシ系の EB-2 接着剤により換気立坑付近計測点に設置したひび割れ検知センサも 2015 年 8 月 4 日の点検で剥離が確認された。ポリエステル系の PS 接着剤に比較し、エポキシ系の EB-2 接着剤は耐湿性に優れているが、例えば写真 5.3 で見られる炭酸カルシウム（白い部分）溶液の吸湿や加水分解反応によりセンサ上にエフロレッセンスが発生した事により剥離が生じたものと推察される。

エポキシ系接着剤は、他にも、粘性が低く貼付面に穴等があった場合埋める事が困難となるという欠点がある。今回も換気立坑付近計測点（写真 5.3）では、貼付面の穴をポリエステル系の PS 接着剤で埋めているが、穴を埋めた接着剤が剥離し、センサベースと貼付面の間に空隙が出来て剥離した可能性も考えられる。

本共同研究では、作業時の空洞安定性等に影響を及ぼす可能性のある支保工のひび割れ発生を迅速に検知する計測技術として、光ファイバ式ひび割れ検知センサが長期的な安全確保技術として有効に機能しうるかに関する検証を行い、本研究の範囲内ではあるが、瑞浪超深地層研究所で実施した「光ファイバ式ひび割れ検知センサおよび支保工接着部の長期耐久性確認試験」の結果より、光ファイバ式ひび割れ検知センサは設置面の平滑整形処理を十分に行い、エポキシ系接着剤 EB-2 を使用する事で地下構造物内の高湿度環境下という特殊な環境下においても 10 年弱にわたって計測システムとしての性能目標を満足できることを実証的に示すことができた。また、エフロレッセンスが発生しセンサ上にかかる事の防止等、今後の課題についても明らかになった。

本センサに限らず、地下における長期間の各種計測では接着剤を用いる場合があるが、本研究のように長期間にわたって接着部の状態変化等を観測した例は稀であり、本研究で適用した確認手法、調査データ等の結果は、今後同種の長期計測が必要となった場合の参考情報として重要な知見を提供するものと考えられる。

参考文献

- 1) 平岩 健一、平井 和英、佐野 禎、大澤 英昭、佐藤 稔紀、青柳 芳明、藤田 朝雄、青柳 和平、稲垣 大介：光ファイバ式ひび割れ検知センサの安全確保技術としての適用性に関する研究（共同研究）、JAEA-Technology 2015-033, 2015, 50p.

This is a blank page.

付録 長期耐久性確認試験 確認作業結果

2015 年 4 月 23 日（1 回目）～2019 年 1 月 29 日（16 回分）

追記：2015 年度調査において換気立坑付近計測点の PS 貼付、EB-2 貼付、立坑間（避難所）計測点の PS 貼付、主立坑付近計測点の PS 貼付の計 4 箇所のひび割れ検知センサに剥離が確認された事より、計測システムとしての機能が失われたと判断し、4 月 26 日をもって同箇所の調査を終了することとした。

2015 年 4 月 23 日 耐久性実証試験結果一覧 (1 回目)

使用機器

測定器 ハンドヘルドデータロガー
光ファイバ導通チェッカ

: TC-32K (Ser.No. A080090771)
: BML205-1

計測点	設置箇所	計測機器	接着剤	指示値 (μ)	加圧治具 (μ)		点灯状態	外観検査	判定
					加圧時	除圧時			
1	換気立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				○	○	正常
			EB-2				○	○	正常
			PS	+668	+668	+668		○	正常
			EB-2	+6745	+6748	+6745		○	正常
2	立坑間 (予備ステージ) 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				○	○	正常
			EB-2				○	○	正常
			PS	+630	+622	+629		○	正常
			EB-2	+632	+631	+632		○	正常
3	主立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				○	○	正常
			EB-2				○	○	正常
			PS	+1035	+1040	+1035		○	正常
			EB-2	+1250	+1245	+1249		○	正常

* 判定について

正常：センサ類、接着状況とも正常

異常：センサあるいは接着面に異常を検知

終了：センサあるいは接着面の異常状態が解消されず計測システムとしての機能が失われた状態

判定条件

※光ファイバ式ひび割れ検知センサ

①先端が点灯すること

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

※検証用ひずみ出力センサ

①加圧治具による加圧前後に指示値の大きな変化が無いこと

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

2015年8月4日 耐久性実証試験結果一覧（2回目）

使用機器

測定器 ハンドヘルドデータータロガー
光ファイバ導通チェッカ

: TC-32K (Ser.No. A080090771)
: BML205-1

計測点	設置箇所	計測機器	接着剤	指示値 (μ)	加圧治具 (μ)		点灯状態	外観検査	判定
					加圧時	除圧時			
1	換気立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				○	×	異常
			EB-2				○	×	異常
			PS	+740	+740	+740		○	正常
			EB-2	+7017	+7016	+7017		○	正常
2	立坑間（予備ステージ） 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				○	×	異常
			EB-2				○	○	正常
			PS	+585	+587	+585		○	正常
			EB-2	+607	+606	+607		○	正常
3	主立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				○	○	正常
			EB-2				○	○	正常
			PS	+1060	+1111	+1060		○	正常
			EB-2	+1470	+1494	+1470		○	正常

* 判定について

正常：センサ類、接着状況とも正常

異常：センサあるいは接着面に異常を検知

終了：センサあるいは接着面の異常状態が解消されず計測システムとしての機能が失われた状態

判定条件

※光ファイバ式ひび割れ検知センサ

①先端が点灯すること

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

※検証用ひずみ出力センサ

①加圧治具による加圧前後に指示値の大きな変化が無いこと

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

2015 年 10 月 26 日 耐久性実証試験結果一覧 (3 回目)

使用機器

測定器 ハンドヘルドデータータロガー : TC-32K (Ser.No. A080090771)
光ファイバ導通チェッカ : BML205-1

計測点	設置箇所	計測機器	接着剤	指示値 (μ)	加圧治具 (μ)		点灯状態	外観検査	判定
					加圧時	除圧時			
1	換気立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				○	×	異常
			EB-2				○	×	異常
			PS	+685	+685	+685		○	正常
			EB-2	+6707	+6708	+6707		○	正常
2	立坑間 (予備ステージ) 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				○	×	異常
			EB-2				○	○	正常
			PS	+641	+639	+641		○	正常
			EB-2	+683	+682	+683		○	正常
3	主立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				○	×	異常
			EB-2				○	○	正常
			PS	+1022	+1034	+1022		○	正常
			EB-2	+1218	+1216	+1218		○	正常

* 判定について

正常：センサ類、接着状況とも正常

異常：センサあるいは接着面に異常を検知

終了：センサあるいは接着面の異常状態が解消されず計測システムとしての機能が失われた状態

判定条件

※光ファイバ式ひび割れ検知センサ

①先端が点灯すること

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

※検証用ひずみ出力センサ

①加圧治具による加圧前後に指示値の大きな変化が無いこと

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

2016 年 1 月 26 日 耐久性実証試験結果一覧（4 回目）

使用機器

測定器 ハンドヘルドデータータロガー : TC-31K (Ser.No. 0412391)
光ファイバ導通チェッカ : BML205-1

計測点	設置箇所	計測機器	接着剤	指示値 (μ)	加圧治具 (μ)		点灯状態	外観検査	判定
					加圧時	除圧時			
1	換気立抗近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				○	×	異常
			EB-2				○	×	異常
			PS	+625	+624	+625		○	正常
			EB-2	+6708	+6709	+6708		○	正常
2	立坑間（予備ステージ） 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				○	×	異常
			EB-2				○	○	正常
			PS	+611	+608	+611		○	正常
			EB-2	+620	+619	+620		○	正常
3	主立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				○	×	異常
			EB-2				○	○	正常
			PS	+1050	+1063	+1051		○	正常
			EB-2	+1220	+1218	+1219		○	正常

* 判定について

正常：センサ類、接着状況とも正常

異常：センサあるいは接着面に異常を検知

終了：センサあるいは接着面の異常状態が解消されず計測システムとしての機能が失われた状態

判定条件

※光ファイバ式ひび割れ検知センサ

①先端が点灯すること

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

※検証用ひずみ出力センサ

①加圧治具による加圧前後に指示値の大きな変化が無いこと

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

2016 年 4 月 26 日 耐久性実証試験結果一覧 (5 回目)

使用機器

測定器 ハンドヘルドデータータロガー : TC-31K (Ser.No. 0412391)
 光ファイバ導通チェッカ : BML205-1

計測点	設置箇所	計測機器	接着剤	指示値 (μ)	加圧治具 (μ)		点灯状態	外観検査	判定
					加圧時	除圧時			
1	換気立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				*	×	終了
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	*****	*****	*****		○	終了
2	立坑間 (予備ステージ) 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+658	+657	+658		○	正常
3	主立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+1863	+1869	+1863		○	正常

* 判定について

正常：センサ類、接着状況とも正常

異常：センサあるいは接着面に異常を検知

終了：センサあるいは接着面の異常状態が解消されず計測システムとしての機能が失われた状態

判定条件

※光ファイバ式ひび割れ検知センサ

①先端が点灯すること

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

※検証用ひずみ出力センサ

①加圧治具による加圧前後に指示値の大きな変化が無いこと

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

2016年8月8日 耐久性実証試験結果一覧（6回目）

使用機器

測定器 ハンドヘルドデータータロガー : TC-32K (Ser.No. A080090771)
光ファイバ導通チェッカ : BML205-1

計測点	設置箇所	計測機器	接着剤	指示値 (μ)	加圧治具 (μ)		点灯状態	外観検査	判定
					加圧時	除圧時			
1	換気立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				*	×	終了
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	*****	*****	*****		○	終了
2	立坑間（予備ステージ） 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+602	+598	+601		○	正常
3	主立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+1563	+1600	+1568		○	正常

* 判定について

正常：センサ類、接着状況とも正常

異常：センサあるいは接着面に異常を検知

終了：センサあるいは接着面の異常状態が解消されず計測システムとしての機能が失われた状態

判定条件

※光ファイバ式ひび割れ検知センサ ※検証用ひずみ出力センサ

①先端が点灯すること

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

①加圧治具による加圧前後に指示値の大きな変化が無いこと

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

2016 年 10 月 20 日 耐久性実証試験結果一覧（7 回目）

使用機器

測定器 ハンドヘルドデータータロガー : TC-32K (Ser.No. A080090771)
光ファイバ導通チェッカ : BML205-1

計測点	設置箇所	計測機器	接着剤	指示値 (μ)	加圧治具 (μ)		点灯状態	外観検査	判定
					加圧時	除圧時			
1	換気立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				*	×	終了
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	*****	*****	*****		○	終了
2	立坑間 (予備ステージ) 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+641	+638	+641		○	正常
3	主立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+1338	+1378	+1338		○	正常

* 判定について

正常：センサ類、接着状況とも正常

異常：センサあるいは接着面に異常を検知

終了：センサあるいは接着面の異常状態が解消されず計測システムとしての機能が失われた状態

※光ファイバ式ひび割れ検知センサ

①先端が点灯すること

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

※検証用ひずみ出力センサ

①加圧治具による加圧前後に指示値の大きな変化が無いこと

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

2017 年 1 月 24 日 耐久性実証試験結果一覧 (8 回目)

使用機器

測定器 ハンドヘルドデータータロガー : TC-32K (Ser.No. A080080682)
光ファイバ導通チェッカ : BML205-1

計測点	設置箇所	計測機器	接着剤	指示値 (μ)	加圧治具 (μ)		点灯状態	外観検査	判定
					加圧時	除圧時			
1	換気立抗近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				*	×	終了
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	*****	*****	*****		○	終了
2	立坑間 (予備ステージ) 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+541	+547	+541		○	正常
3	主立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+1132	+1140	+1135		○	正常

* 判定について

正常：センサ類、接着状況とも正常

異常：センサあるいは接着面に異常を検知

終了：センサあるいは接着面の異常状態が解消されず計測システムとしての機能が失われた状態

判定条件

※光ファイバ式ひび割れ検知センサ

①先端が点灯すること

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

※検証用ひずみ出力センサ

①加圧治具による加圧前後に指示値の大きな変化が無いこと

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

2017 年 4 月 25 日 耐久性実証試験結果一覧 (9 回目)

使用機器

測定器 ハンドヘルドデータータロガー
光ファイバ導通チェッカ

: TC-32K (Ser.No. 0010010)
: BML205-1

計測点	設置箇所	計測機器	接着剤	指示値 (μ)	加圧治具 (μ)		点灯状態	外観検査	判定
					加圧時	除圧時			
1	換気立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				*	×	終了
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	*****	*****	*****		○	終了
2	立坑間 (予備ステージ) 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+526	+528	+526		○	正常
3	主立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+1266	+1282	+1266		○	正常

* 判定について

正常：センサ類、接着状況とも正常

異常：センサあるいは接着面に異常を検知

終了：センサあるいは接着面の異常状態が解消されず計測システムとしての機能が失われた状態

判定条件

※光ファイバ式ひび割れ検知センサ

①先端が点灯すること

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

※検証用ひずみ出力センサ

①加圧治具による加圧前後に指示値の大きな変化が無いこと

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

2017 年 7 月 27 日 耐久性実証試験結果一覧 (10 回目)

使用機器

測定器 ハンドヘルドデータータロガー : TC-32K (Ser.No. 0010010)
光ファイバ導通チェッカ : BML205-1

計測点	設置箇所	計測機器	接着剤	指示値 (μ)	加圧治具 (μ)		点灯状態	外観検査	判定
					加圧時	除圧時			
1	換気立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				*	×	終了
			PS	*****	*****			○	終了
			EB-2	*****	*****			○	終了
2	立坑間 (予備ステージ) 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****			○	終了
			EB-2	+865	+877	+864		○	正常
3	主立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****			○	終了
			EB-2	+1351	+1370	+1351		○	正常

* 判定について

正常：センサ類、接着状況とも正常

異常：センサあるいは接着面に異常を検知

終了：センサあるいは接着面の異常状態が解消されず計測システムとしての機能が失われた状態

判定条件

※光ファイバ式ひび割れ検知センサ

①先端が点灯すること

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

※検証用ひずみ出力センサ

①加圧治具による加圧前後に指示値の大きな変化が無いこと

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

2017 年 10 月 31 日 耐久性実証試験結果一覧 (11 回目)

使用機器

測定器 ハンドヘルドデータータロガー
光ファイバ導通チェッカ

: TC-31K (Ser.No. 0412391)
: BML205-1

計測点	設置箇所	計測機器	接着剤	指示値 (μ)	加圧治具 (μ)		点灯状態	外観検査	判定
					加圧時	除圧時			
1	換気立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				*	×	終了
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	*****	*****	*****		○	終了
2	立坑間 (予備ステージ) 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+566	+570	+567		○	正常
3	主立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+1222	+1230	+1223		○	正常

* 判定について

正常：センサ類、接着状況とも正常

異常：センサあるいは接着面に異常を検知

終了：センサあるいは接着面の異常状態が解消されず計測システムとしての機能が失われた状態

判定条件

※光ファイバ式ひび割れ検知センサ

①先端が点灯すること

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

※検証用ひずみ出力センサ

①加圧治具による加圧前後に指示値の大きな変化が無いこと

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

2018 年 1 月 30 日 耐久性実証試験結果一覧 (12 回目)

使用機器

測定器 ハンドヘルドデーターロガー
 光ファイバ導通チェッカ
 : TC-32K (Ser.No. 0010010)
 : BML205-1

計測点	設置箇所	計測機器	接着剤	指示値 (μ)	加圧治具 (μ)		点灯状態	外観検査	判定
					加圧時	除圧時			
1	換気立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				*	×	終了
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	*****	*****	*****		○	終了
2	立坑間 (予備ステージ) 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+551	+560	+551		○	正常
3	主立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+1215	+1218	+1216		○	正常

* 判定について

正常：センサ類、接着状況とも正常

異常：センサあるいは接着面に異常を検知

終了：センサあるいは接着面の異常状態が解消されず計測システムとしての機能が失われた状態

判定条件

※光ファイバ式ひび割れ検知センサ

①先端が点灯すること

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

※検証用ひずみ出力センサ

①加圧治具による加圧前後に指示値の大きな変化が無いこと

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

2018 年 4 月 27 日 耐久性実証試験結果一覧 (13 回目)

使用機器

測定器 ハンドヘルドデータータロガー : TC-32K (Ser.No. 0010010)
光ファイバ導通チェッカ : BML205-1

計測点	設置箇所	計測機器	接着剤	指示値 (μ)	加圧治具 (μ)		点灯状態	外観検査	判定
					加圧時	除圧時			
1	換気立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				*	×	終了
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	*****	*****	*****		○	終了
2	立坑間 (予備ステージ) 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+692	+688	+691		○	正常
3	主立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+1221	+1230	+1223		○	正常

* 判定について

正常：センサ類、接着状況とも正常

異常：センサあるいは接着面に異常を検知

終了：センサあるいは接着面の異常状態が解消されず計測システムとしての機能が失われた状態

判定条件

※光ファイバ式ひび割れ検知センサ ※検証用ひずみ出力センサ

①先端が点灯すること ①加圧治具による加圧前後に指示値の大きな変化が無いこと

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと ②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

2018 年 7 月 26 日 耐久性実証試験結果一覧 (14 回目)

使用機器

測定器 ハンドヘルドデータータロガー : TC-32K (Ser.No. 0010010)
光ファイバ導通チェッカ : BML205-1

計測点	設置箇所	計測機器	接着剤	指示値 (μ)	加圧治具 (μ)		点灯状態	外観検査	判定
					加圧時	除圧時			
1	換気立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				*	×	終了
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	*****	*****	*****		○	終了
2	立坑間 (予備ステージ) 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+850	+863	+850		○	正常
3	主立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+1422	+1450	+1424		○	正常

* 判定について

正常：センサ類、接着状況とも正常

異常：センサあるいは接着面に異常を検知

終了：センサあるいは接着面の異常状態が解消されず計測システムとしての機能が失われた状態

※光ファイバ式ひび割れ検知センサ

①先端が点灯すること

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

※検証用ひずみ出力センサ

①加圧治具による加圧前後に指示値の大きな変化が無いこと

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

2018 年 10 月 25 日 耐久性実証試験結果一覧 (15 回目)

使用機器

測定器 ハンドヘルドデータータロガー : TC-32K (Ser.No. 0010010)
光ファイバ導通チェッカ : BML205-1

計測点	設置箇所	計測機器	接着剤	指示値 (μ)	加圧治具 (μ)		点灯状態	外観検査	判定
					加圧時	除圧時			
1	換気立抗近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				*	×	終了
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	*****	*****	*****		○	終了
2	立坑間 (予備ステージ) 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+653	+659	+653		○	正常
3	主立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+1305	+1320	+1310		○	正常

* 判定について

正常：センサ類、接着状況とも正常

異常：センサあるいは接着面に異常を検知

終了：センサあるいは接着面の異常状態が解消されず計測システムとしての機能が失われた状態

判定条件

※光ファイバ式ひび割れ検知センサ

①先端が点灯すること

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

※検証用ひずみ出力センサ

①加圧治具による加圧前後に指示値の大きな変化が無いこと

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

2019 年 1 月 29 日 耐久性実証試験結果一覧 (16 回目)

使用機器

測定器 ハンドヘルドデータロガー : TC-32K (Ser.No. A080100913)
 光ファイバ導通チェッカ : BML205-1

計測点	設置箇所	計測機器	接着剤	指示値 (μ)	加圧治具 (μ)		点灯状態	外観検査	判定
					加圧時	除圧時			
1	換気立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				*	×	終了
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	*****	*****	*****		○	終了
2	立坑間 (予備ステージ) 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+468	+474	+469		○	正常
3	主立坑近傍水平坑道 吹付けコンクリート	光ファイバ式ひび割れ検知センサ 検証用ひずみ出力センサ	PS				*	×	終了
			EB-2				○	○	正常
			PS	*****	*****	*****		○	終了
			EB-2	+1086	+1100	+1087		○	正常

* 判定について

正常：センサ類、接着状況とも正常

異常：センサあるいは接着面に異常を検知

終了：センサあるいは接着面の異常状態が解消されず計測システムとしての機能が失われた状態

判定条件

※光ファイバ式ひび割れ検知センサ

①先端が点灯すること

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

※検証用ひずみ出力センサ

①加圧治具による加圧前後に指示値の大きな変化が無いこと

②目視により接着部に浮きや剥がれの無いこと

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량	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 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	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	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	キログラム毎立方メートル	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	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	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)	°C		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	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
酸素活性化	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のみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(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
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎平方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	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
	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	名称	記号	乗数	名称	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=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=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	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm 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。
ベレル	B	
デシベル	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	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 =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオット	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe Δ (10 ³ /4 π) A m ⁻¹

(a) 3 元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 Δ 」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=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
ミクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

