



JAEA-Technology

2016-004

DOI:10.11484/jaea-technology-2016-004

## 砂利の除染試験

### —敷砂利及びバラストの効果的な除染方法の確立—

Decontamination Test of Gravel  
- Establishment of Effective Decontamination Methods  
about Paving Gravel and Ballast -

加藤 貢 田辺 務 梅澤 克洋 和田 孝雄

Mitsugu KATO, Tsutomu TANABE, Katsuhiro UMEZAWA and Takao WADA

福島研究開発部門  
福島環境安全センター

Fukushima Environmental Safety Center  
Sector of Fukushima Research and Development

March 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

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 (<http://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

© Japan Atomic Energy Agency, 2016

砂利の除染試験  
—敷砂利及びバラストの効果的な除染方法の確立—

日本原子力研究開発機構  
福島研究開発部門 福島環境安全センター

加藤 貢、田辺 務、梅澤 克洋、和田 孝雄<sup>+1</sup>

(2016年1月18日 受理)

東京電力福島第一原子力発電所の事故により、放射性物質が環境中に飛散したため、空間線量率を下げるべく除染作業が進められている。このうち、住宅、公共施設、墓地、軌道等に敷いている砂利について、物理的な複数の方法により除染試験を行った。

試験としては、材質や形状の異なる各砂利に対し、摩砕やブラスト等の除染効果の可能性がある機器を用いて、作業性や安全性における合理的かつ高い除染効果が得られる除染方法を確立することを目的とした。

試験結果から、砂利の特徴に応じた除染方法による適用性と除染効果(低減率)を確認できた。一括りに砂利といっても特徴があるため、砂利の特徴に応じた除染方法を選択する必要があることが分かった。また、同じ場所から採取した砂利でも個々の汚染状態に大きなバラツキがあることも分かったため、除染前後の測定では、汚染状態のバラつきに応じた手法と手順、仕様を採用することが肝要である。

砂利の除染作業を行うときは、砂利の特徴及び処理する量を事前に把握して、適切な除染方法と計画を立てることが効果的である。

Decontamination Test of Gravel

- Establishment of Effective Decontamination Methods about Paving Gravel and Ballast -

Mitsugu KATO, Tsutomu TANABE, Katsuhiko UMEZAWA and Takao WADA<sup>+1</sup>

Fukushima Environmental Safety Center  
Sector of Fukushima Research and Development  
Japan Atomic Energy Agency  
Fukushima-shi, Fukushima-ken

(Received January 18, 2016)

After the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident, widespread contamination, by radioactive materials occurred. Thus, decontamination work has been developed because of reducing air dose rate. Of this, in order to examine decontamination effect about gravel which covers sites of houses, communal facilities and cemeteries, and about ballast laid on a track, Japan Atomic Energy Agency (JAEA) examined a decontamination test by physical plural methods.

The objective of this testing is to establish rational and high effective decontamination methods to decontaminate each different gravel of materials and the shape, using the equipment which have possibility of the decontamination effect by trituration or blast.

From the test results, applicability of the decontamination method depending on a characteristic of the gravel and the decontamination effect (reduction rate) are confirmed. There are various characteristics with the thing said to be gravel. It is confirmed that one decontamination method cannot be applied to all types of gravel. Furthermore, it is confirmed that there is great variability among individual polluted condition in the gravel gathered from the same place. Therefore, it is important to measure the degree of pollution so that a measurement error becomes as little as possible. For example, to measure plural points of the measurement side and keeping the height of measurement constant.

When carrying out the decontamination work of gravel, it is effective to understand the characteristics of gravel and the amount of work object preliminarily and to make a plan with an appropriate decontamination method.

Keywords : Ballast, Trituration, Blast

---

<sup>+1</sup> Safety Administration Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories, Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

## 目 次

1.	はじめに	1
2.	試験内容	2
2.1	砂利の種類	2
2.1.1	施設・宅地	2
2.1.2	常磐線	3
2.2	試験使用機器	4
2.2.1	除染使用機械	4
2.2.2	測定機器	5
2.3	模擬試験	6
2.3.1	摩砕方式	6
2.3.2	キャビテーション方式	6
2.3.3	ブラスト方式	7
2.4	試験	9
2.4.1	摩砕方式	9
2.4.2	キャビテーション方式	28
2.4.3	ブラスト方式	36
3.	放射性物質の分布確認	108
3.1	除染前後の分布状態	108
3.1.1	確認方法	108
3.1.2	樹脂固着作業	108
3.1.3	IP サンプルのカット作業	110
3.1.4	IP シートへの露光状況と養生	110
3.1.5	画像解析装置による IP シートデータのスキャン・解析	111
3.1.6	砂利断面の分布状態	111
3.1.7	砂利表面の分布状態	113
3.1.8	考察	114
3.2	砂利の自然放射線量測定	115
3.2.1	砂利の種類	115
3.2.2	試験方法	115
3.2.3	放射線量測定方法	116
3.2.4	試験結果	116
3.2.5	考察	116
4.	結果と考察	117
4.1	砂利、使用機器及び除染方法のまとめ	117
4.1.1	試験に用いた砂利の特徴と物理的効果	117

4.1.2 各試験結果の評価と考察	119
4.2 花崗岩の低減率と研削率の相関関係	124
4.3 JR 常磐線の砂利（バラスト）の有効な砂利の除染方法	125
5. おわりに	127
謝辞	129
参考文献	129

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Examination Contents .....	2
2.1 The Kinds of Gravel .....	2
2.1.1 Houses, Facilities .....	2
2.1.2 JR Joban Line .....	3
2.2 The Instruments Used in this Test .....	4
2.2.1 The Instruments Used in this Decontamination Work .....	4
2.2.2 The Instruments Used in this Measurement Work .....	5
2.3 Mock Test .....	6
2.3.1 The Method of Trituration .....	6
2.3.2 The Method of Cavitation .....	6
2.3.3 The Method of Blast .....	7
2.4 Testing .....	9
2.4.1 The Method of Trituration .....	9
2.4.2 The Method of Cavitation .....	28
2.4.3 The Method of Blast .....	36
3. Distribution Confirmation of Radioactive Materials .....	108
3.1 Distribution State of the Pre- and Post- decontamination Work .....	108
3.1.1 The Method of Confirmation .....	108
3.1.2 Resin Fixing Work .....	108
3.1.3 Cutoff Operation of Imaging Plate Samples .....	110
3.1.4 Exposing Condition and Curing of Imaging Plate Sheets .....	110
3.1.5 Scanning and Analysis of Imaging Plate Sheets by Image Analysis System .....	111
3.1.6 Distribution Condition on the Cross-section of Gravel .....	111
3.1.7 Distribution Condition on the Surface of Gravel .....	113
3.1.8 Consideration .....	114
3.2 Measurement of Natural Radiation Dose of Gravel .....	115
3.2.1 The Kinds of Gravel .....	115
3.2.2 Testing Method .....	115
3.2.3 Measuring Method of Radiation .....	116
3.2.4 Test Results .....	116
3.2.5 Consideration .....	116
4. Results and Consideration .....	117
4.1 Summary of Gravel, Used Instruments and Decontamination Method .....	117
4.1.1 Characteristics of the Gravel Used in this Test and Physical Effect .....	117

4.1.2 Evaluation and Consideration of Each Test Results .....	119
4.2 Correlation between Contamination Reduction Rate and Grinding Rate of Granite .....	124
4.3 Effective Decontamination Method for Gravel (Ballast) on JR Joban Line .....	125
5. Closing .....	127
Acknowledgment .....	129
References .....	129

## 1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の事故により、放射性物質が環境中に飛散したため、空間線量率を下げるべく除染作業が進められている。このうち砂利については、住宅、公共施設及び墓地等に敷いている場合が多く、環境省の除染関係ガイドラインの記載では、砂利・碎石を水槽に入れ、攪拌や高圧水洗浄により砂利・碎石の放射性物質を除去し、洗浄後に再敷設を行うとしている（環境省、除染関係ガイドライン平成 25 年 5 月第 2 版）<sup>1)</sup>。また、福島市が実施している除染の実施手順には、除染管理基準が 600cpm 以下の汚染レベルが低い砂利を対象として、高圧洗浄による除染を行い再利用するか、または除去して新しい砂利を敷設することとなっている（福島市、除染マニュアル）。高圧洗浄方法は簡易であるが、砂利の表面に付着した細粒土砂やコケ等を除去する程度しか期待できない（日本原子力研究開発機構 除染モデル実証事業編 報告書<sup>2)</sup>2.4.2(1) ①(b) I 宅地より 「碎石洗浄による宅地庭部の除染方法の詳細」（除染技術情報及び 参照 <http://c-navi.jaea.go.jp/ja/remediation-work/2013-04-10-03-58-46/residential/residential-12-2/residential-12-3.html>））。

一方で、汚染した砂利は、その表面を削ることで高い除染効果が得られる可能性があるため（平成 25 年 研究開発成果報告会～環境回復に向けての取り組み～住宅敷地内砂利の除染～摩砕方式と超音波洗浄方式～）、汚染レベルが高い砂利に対しても除染を積極的に行い、敷地内に再敷設し再使用することで線量率低減化が図れる可能性がある。また、事故で長期間運休となっている JR 常磐線（広野～原ノ町間の約 55km、2014 年 6 月 1 日から広野～竜田間が運転再開）の運転再開には、バラスト（砂利）を全量入れ替える必要があり大量の使用済みバラスト（フレキシブルコンテナで十数万体程度）が発生する。これらの砂利を除染して再利用するか、除染しないで全量除去物として処分するかで中間貯蔵施設への負担が大きく変わる。

放射性物質が付着した砂利の調査、除染は幾つか進められているが検証（日本原子力研究開発機構 除染モデル実証事業等）、材質や形状の異なるそれぞれの砂利についての除染方法や、多量の砂利を一度に除染する方法等については検証されているものはない。また、これまでに検証に使用され効果が得られた除染機器は汎用的ではないため、一般に市販され多くの除染業者が使用できる方法で効率よく砂利を除染する方法は、まだ確立されていないのが現状である。

そこで本試験では、材質や形状の異なる砂利（JR 常磐線に敷設されたバラストや民家等に敷設された砂利）を対象にして除染試験を行い、各砂利の種類に対して作業性や安全性において合理的かつ高い除染効果が得られる除染方法を確立することを目的とした。

## 2. 試験内容

### 2.1 砂利の種類

#### 2.1.1 施設・宅地

施設・宅地の砂利は、砂利の種類及び汚染の程度別に図 2.1 に示した富岡町の 4 箇所から採取した。

採取場所	採取場所写真 (表面線量率)	砂利写真 (粒径)
リフレ富岡 宿泊棟 雨だれ部	 (約 10 $\mu$ Sv/h)	 (約 1~4cm)
リフレ富岡 屋上	 (約 4 $\mu$ Sv/h)	 (約 1~3cm)
富岡町役場 バス車庫屋上	 (約 1 $\mu$ Sv/h)	 (約数 mm~2cm)
民家 富岡町 中央地内	 (約 1 $\mu$ Sv/h)	 (約数 mm)

図 2.1 砂利の採取場所および砂利の種類

各採取場所の深さ方向の線量等は、リフレ富岡の雨だれ部の砂利を除いて、地表面に近い砂利ほど線量率と汚染密度ともに高くなった。これは、飛散した放射性セシウムが地表面の砂利に固着したことに起因する。一方で、リフレ富岡の雨だれ部の砂利は、底部ほど汚染密度が高かった。この原因と

して、屋根に付着した放射性セシウムが雨水とともに流れ砂利に固着する間も無く底部のマット材料に浸透・吸着し、マットの線量が高かったためである。

### 2.1.2 常磐線

常磐線のバラストは、汚染の程度別に図 2.2 に示した富岡町内管区の 2 箇所採取した。

採取場所	採取場所写真 (表面線量率)	砂利写真 (粒径)
夜ノ森駅 (JR 常磐線)	 <p>(約 2 <math>\mu</math> Sv/h)</p>	 <p>(約 1~8cm)</p>
太田陸前浜 街道踏切 (JR 常磐線)	 <p>(約 0.5 <math>\mu</math> Sv/h)</p>	 <p>(約 1~8cm)</p>

図 2.2 バラストの採取場所

## 2.2 試験使用機器

### 2.2.1 除染使用機械

砂利の表面を削る工法として、砂利の共摺りと表面はつり（水圧、研削材投射等）が挙げられる。除染機械は汎用性が高いもの、また、砂利を均一に除染できる可能性が高いものを調査した。本試験で使用した主要な除染機械を、図 2.3 に示す。

除染機械名	写真	仕様
<p>研磨機 (摩砕工法)</p>		<p>機種：パワーロールフロー EVFX-1</p> <p>回転数：MAX250rpm 投入部容量：30L 混合量：20L</p>
<p>モルタルミキサー (摩砕工法)</p>		<p>機種：高速ミキサー SL-5N</p> <p>回転数：150rpm 投入部容量：180L 混合量：120L</p>
<p>超音波洗浄器 (キャビテーション工法)</p>		<p>機種：US-200 (2周波型)</p> <p>発振：28kHz、38kHz PZT 自励発振</p> <p>槽容量：20.4L 高周波出力：320W</p>
<p>高圧水洗浄機 (ブラスト工法_高圧水)</p>		<p>機種：HDS1000BE ハンドガンタイプ</p> <p>圧力：20MPa 水量：15L/min</p> <p>機種：ポットミキサー30DX 回転数：28rpm (50Hz) 投入部容量：50L 混合量：30L</p>

図 2.3 主要な除染機械 (1/2)

<p>超高压水洗浄機 (ブラスト工法_超高压水)</p>		<p>機種：Jリムーバー ハンドガンタイプ 最大圧力：280MPa 最大水量：22.7L/min</p> <p>機種：ポットミキサー30DX 回転数：28rpm (50Hz) 投入部容量：50L 混合量：30L</p>
<p>ウェットブラスト (ブラスト工法_研磨材)</p>		<p>機種：ココット 空気圧力：0.4MPa 研磨材：アルミナ多角形</p>

図 2.3 主要な除染機械(2/2)

### 2.2.2 測定機器

本試験で使用した測定機器を、図 2.4 に示す。

測定機名	写真	仕様
<p>スキャナータイプ 画像解析装置</p>		<p>機種：Typhoon FLA 7000</p>
<p>BAS イメージングプレート</p>		<p>機種：BAS IP MS 2040E</p>

図 2.4 測定機器

## 2.3 模擬試験

除染試験にあたり、各試験機器が砂利に対してどれ位の研削力があるか、また、研削後の表面研磨度の状態を予察的に確認するため、汚染していない市販の砂利等に油性ペイントを塗布して着色し汚染状態に見立てた砂利等を対象とした模擬試験を実施した。

### 2.3.1 摩砕方式

摩砕方式として試験に用いたバレル研磨機（写真 2.1）は、槽底のパーセーターを回転し、渦巻き状の水流で砂利を連続して研削する。これは、洗濯機でいう擦り洗いで強力な研削力があり、砂利の表面が確実に削れるため、高い除染効果が期待できる。除染した砂利は再使用することを考慮し、処理によって砂利が割れにくい条件および処理時間と除染効果のバランスを見出す必要がある。

模擬試験では、ホームセンターで販売している五色敷石の砂利を調達し、処理時間と配合比を変えて研削状況を把握した。例えば 20kg の砂利（18kg の砂利と油性ペイントで着色した砂利 2kg）、に 20ℓ の水を加え、20 分の処理時間で行った結果、研削した砂利の量が約 1.6kg（砂利の約 8%）、割れた砂利の量が約 10g（砂利の約 0.05%）となり、十分な研削力の割に砂利の割れがほとんど生じていない。残りの砂利のうち、着色した砂利の状態を観察すると 9 割以上の砂利について、ほぼ全表面のペイントが研削されていることを確認した。



写真 2.1 バレル研磨機による模擬試験状況

### 2.3.2 キャビテーション方式

超音波洗浄方式として試験に用いた超音波洗浄機（写真 2.2）は、キャビテーション効果の強い周波数（28kHz、40kHz の併用）を採用することにより、砂利表面を研削して除染が期待できる。放射性セシウムが砂利表面の凹凸に付着している状態により除染効果が異なるため、処理時間がどれだけ必要か確認する必要がある。

模擬試験では、超音波洗浄機の容量に合わせ、2kg の砂利（摩砕方式で試験した砂利と同じホームセンターで販売している五色敷石に油性で着色した砂利を追加）、10ℓ の水、60 分の処理時間で行った結果、一度摩砕方式で表面を削って水で十分に濯いだ砂利からでも超音波洗浄で研削物（除去物）が出てくることを確認した。



着色した砂利を投入

処理後の状態

砂利を取除いた処理後の水

写真 2.2 超音波洗浄機による模擬試験状況

### 2.3.3 ブラスト方式

ブラスト方式として試験に用いた高圧水洗浄機（最大圧力 15MPa）および超高圧水洗浄機（最大圧力 240MPa）は、加圧した水をガンタイプのノズルから噴射させて砂利に投射し、表面を削ることで除染が期待できる。除染した砂利は再使用することを考慮し、処理によって砂利が割れにくい条件および処理時間と除染効果のバランスを見出す必要がある。

模擬試験では二種類の方法で行った。一つは、篩内に約 5kg の砂利（採取した砂利に油性で着色）を金網ではさみ込んで固定し、200MPa の圧力で表と裏からそれぞれ 3 分間の処理時間で投射した。洗浄状態を観察した結果（写真 2.3）、砂利に高い圧力で鉛直方向に投射した部分は削られているが、高い圧力が当たらない側面部分に目視で 2 割以上の削りムラがあることを確認した。

もう一つは、セメントミキサー（以下「ミキサー」という。）に約 18kg の砂利（路盤に敷いていた砂利に油性で着色）を入れて攪拌し、圧力を変えて 3 分間の処理時間で投射した（写真 2.4）。洗浄状態を観察した結果（写真 2.5）、15MPa や 100MPa の圧力では凸部を脱色するまでの効果はなかったが 200MPa の圧力では、少なくとも各砂利表面の 9 割以上の着色した部分が研削できることを確認した。



着色した砂利

200MPa の圧力で洗浄

洗浄後の状態

写真 2.3 砂利を固定した場合の試験状況



着色した砂利を投入

高圧水洗浄(15MPa)

超高圧水洗浄(100、200MPa)

写真 2.4 砂利を動かした場合の試験状況



洗浄後(15MPa)



洗浄後(100MPa)



洗浄後(200MPa)

写真 2.5 圧力の違いによる研削状態

## 2.4 試験

### 2.4.1 摩砕方式

摩砕方式では、水を入れない乾式で行った方が高い共摺り効果が得られると思われるが、研削物の飛散防止対策が必要であり、また、砂利から研削物を分離するために水が必要となる。このため、槽の中に一定量の砂利と水を入れて攪拌し、砂利を共摺りさせ表面を削ることが除染に有効であると考え、縦型洗濯機の構造をしたパルセータを回転させて攪拌する方法と、モルタルを練るミキサーで攪拌羽根を回転させて攪拌する方法の二種類で実施した。また、攪拌羽根式方法については、除染砂利への放射性物質再付着の有無及び砂利と除染水との分離（濯ぎ）具合の確認するため、ポリイオンの添加試験を行った。

#### 2.4.1.2 研磨機（パルセータ式）

##### (1) 砂利の種類

砂利は、2.1 節の図 2.1 に示した内のリフレ富岡屋上及びリフレ富岡宿泊棟雨だれ部を使用した。

##### (2) 使用機械

使用機械は 2.2 節の図 2.3 に示した内の研磨機を使用した。

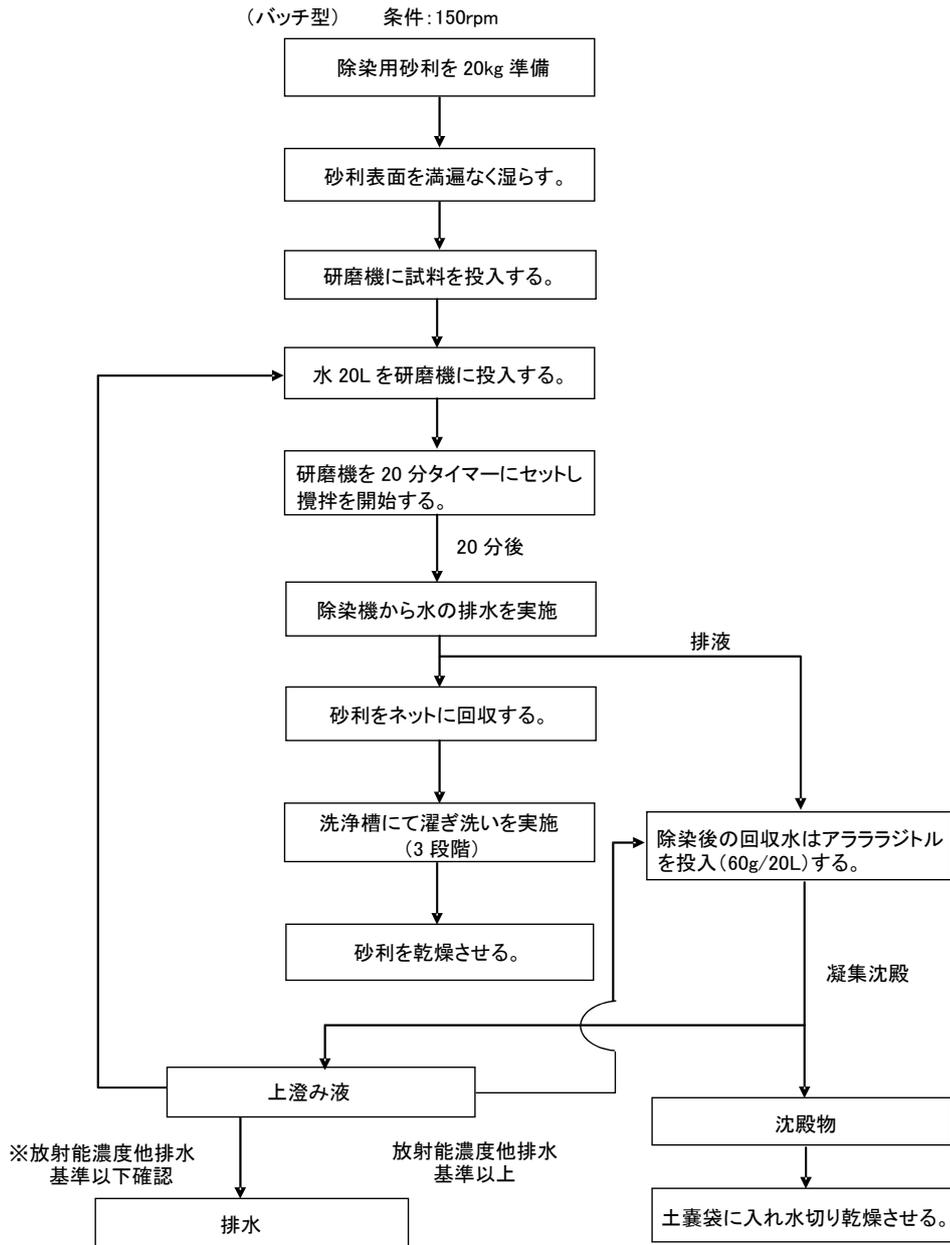
##### (3) 試験方法

モルタルミキサーの中に砂利と水及びポリイオンを入れ攪拌羽根を回して除染試験を行い、ポリイオンの効果を確認した。

試験パターンを表 2.1 に、試験フローを図 2.5 に示す。

表 2.1 研磨機試験パターン

No.	砂利の種類	研磨条件	砂利の重量	試験時間
1	リフレ富岡 屋上	水の入替え無	20kg	20分
		水の入替え5分毎		20分
		水の入替え無		40分
		水の入替え無		60分
2	リフレ富岡宿泊棟 雨だれ部	水の入替え無		20分
		水の入替え5分毎		20分
		水の入替え無		40分
		水の入替え無		60分



※ 放射能濃度排水基準: Cs134 60Bq/L、Cs137 90Bq/L 以下。  
混在する場合はそれぞれの濃度÷基準値の和が1以下  
他: BOD、COD で 20mg/L、SS で 50mg/L 以下

図 2.5 研磨機試験フロー (「20 分後」のところは「20 分または 40 分後」)

試験前測定として砂利の重量と放射線量を測定した。測定終了後、砂利と水 20L を研磨機の中に投入し 20 分間運転した。この時、研削物中の放射性セシウムが砂利に再付着するか否かを確認するため、20 分間の処理において、5 分毎に水を全量交換した場合 (試験モード R2) と 20 分間通して使用した場合 (試験モード R1) の 2 ケースで運転を行った。また、運転時間を延長した場合の摩砕率と低減率の傾向を見るため、40 分及び 60 分間運転した。運転し終わった後、砂利を研磨機の中から取り出し、きれいな水で濯いでから乾燥させ、放射線量測定を行った。

(4) 試験状況

パルセータ式攪拌機の試験状況を写真 2.6 に示す。



砂利投入



砂利投入



水投入



運転状況



水排出



砂利排出



濯ぎ



水切り、乾燥

写真 2.6 パルセータ式攪拌機の試験状況

(5) 試験結果と考察

(5)-1 表面汚染密度

図 2.6～8 及び表 2.2 に表面汚染密度と低減率の関係（砂利重量 20kg）を示す。

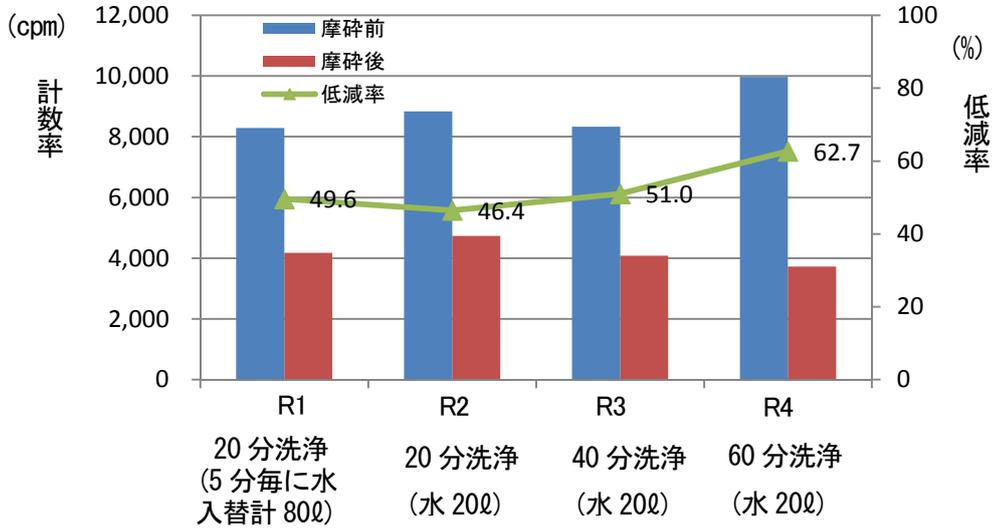


図 2.6 試験前後における表面汚染密度（モード平均）

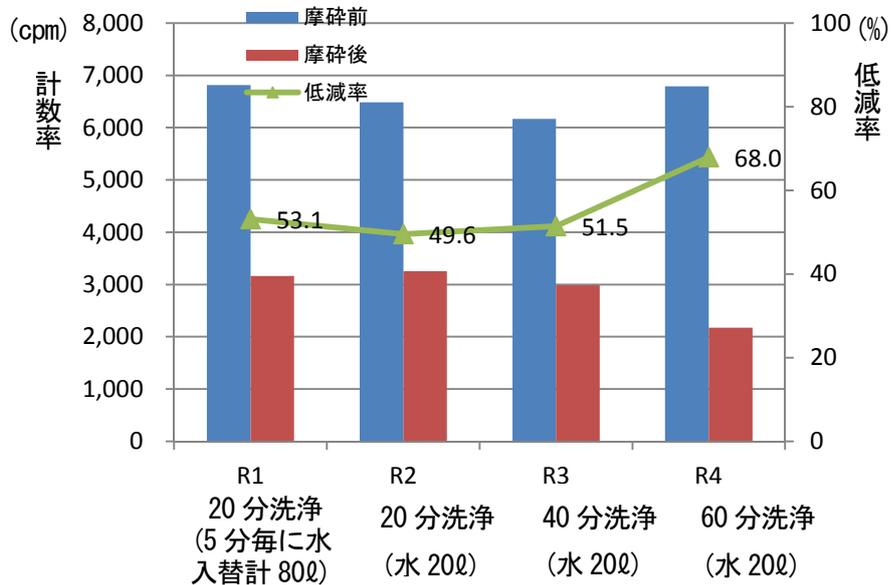


図 2.7 試験前後における表面汚染密度（リフレ富岡屋上）

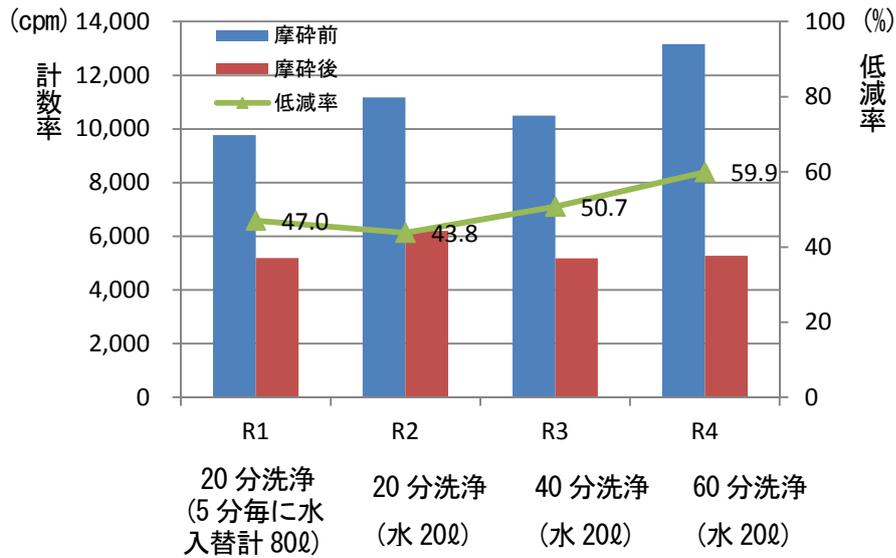


図 2.8 試験前後における表面汚染密度（リフレ富岡宿泊棟雨だれ部）

表 2.2 表面汚染密度と低減率の関係

試験モード	採取場所	試験（摩砕）前 (cpm)		試験（摩砕）後 (cpm)		低減率 (%)	
		種類平均	モード平均	種類平均	モード平均	種類平均	モード平均
R1	リフレ富岡屋上	6812.5	8293.8	3162.5	4178.1	53.1	49.6
	リフレ富岡宿泊棟雨だれ部	9775.0		5193.8		47.0	
R2	リフレ富岡屋上	6487.5	8831.3	3256.3	4731.3	49.6	46.4
	リフレ富岡宿泊棟雨だれ部	11175.0		6206.3		43.8	
R3	リフレ富岡屋上	6168.8	8334.4	2987.5	4081.3	51.5	51.0
	リフレ富岡宿泊棟雨だれ部	10500.0		5175.0		50.7	
R4	リフレ富岡屋上	6787.5	9975.0	2175.0	3725.0	68.0	62.7
	リフレ富岡宿泊棟雨だれ部	13162.5		5275.0		59.9	

R1: 砂利 20kg、水 20ℓ、時間 20 分、回転数:150rpm、20 分後に水を排出

R2: 砂利 20kg、水 20ℓ、時間 20 分、回転数:150rpm、5 分毎に水を全量交換

R3: 砂利 20kg、水 20ℓ、時間 40 分、回転数:120rpm、40 分後に水を排出

R4: (R1 の試験後試料を使つての追加試験) 砂利 20kg、水 20ℓ、時間 40 分、回転数:150rpm、40 分後に水を排出。試験後、低減率は、処理時間が 60 分後の値

リフレ富岡の宿泊棟雨だれ部の砂利は全て花崗岩であるのに対し、屋上の砂利は一部堆積岩が混じっている。この二種類の砂利の低減率を見比べると、堆積岩が混じっている屋上の砂利の方が若干ではあるが除染効果が高いことが分かった。また、研削物中の放射性セシウムが砂利に再付着するか否

かの確認では、有意な差は見られず使用する水を多くしなくても良いことが分かった。

(5)-2 表面線量率

図 2.9~11 及び表 2.3 に表面線量率と低減率の関係（砂利重量 20kg）を示す。

表面線量率の結果は、前記に示した表面汚染密度の結果とほぼ同じ結果であった。

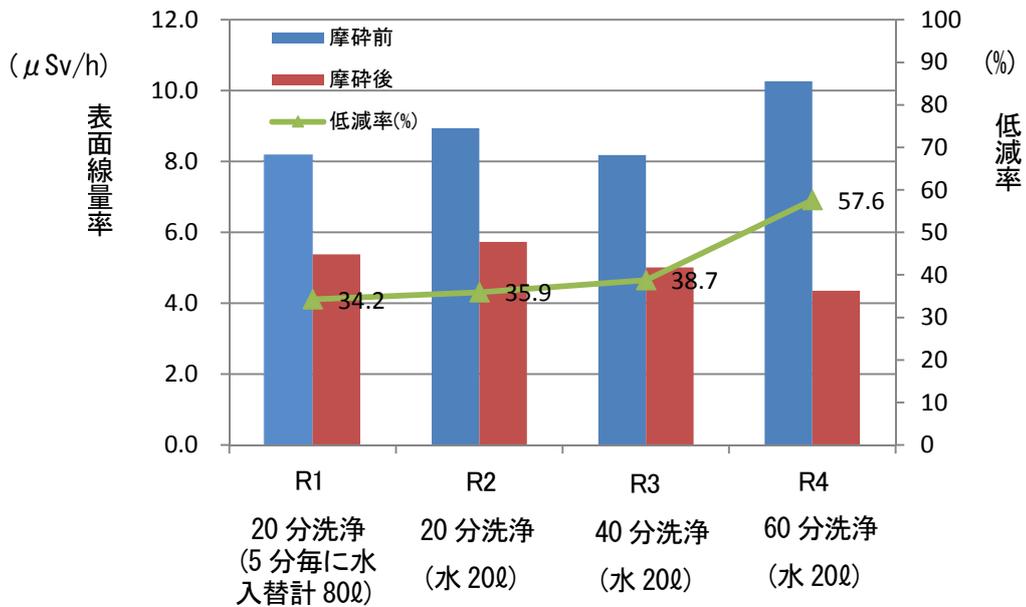


図 2.9 試験前後における表面線量率（モード平均）

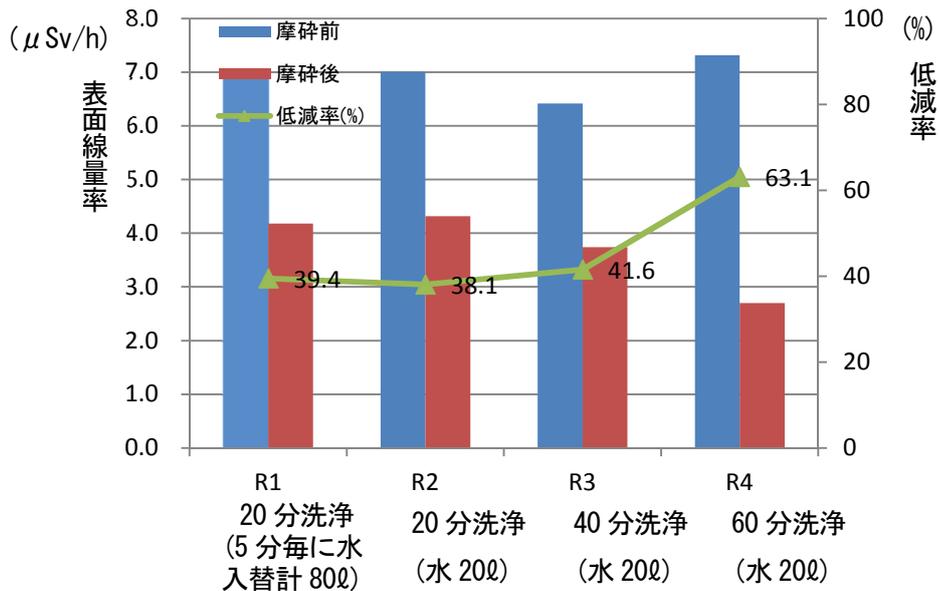


図 2.10 試験前後における表面線量率（リフレ富岡屋上）

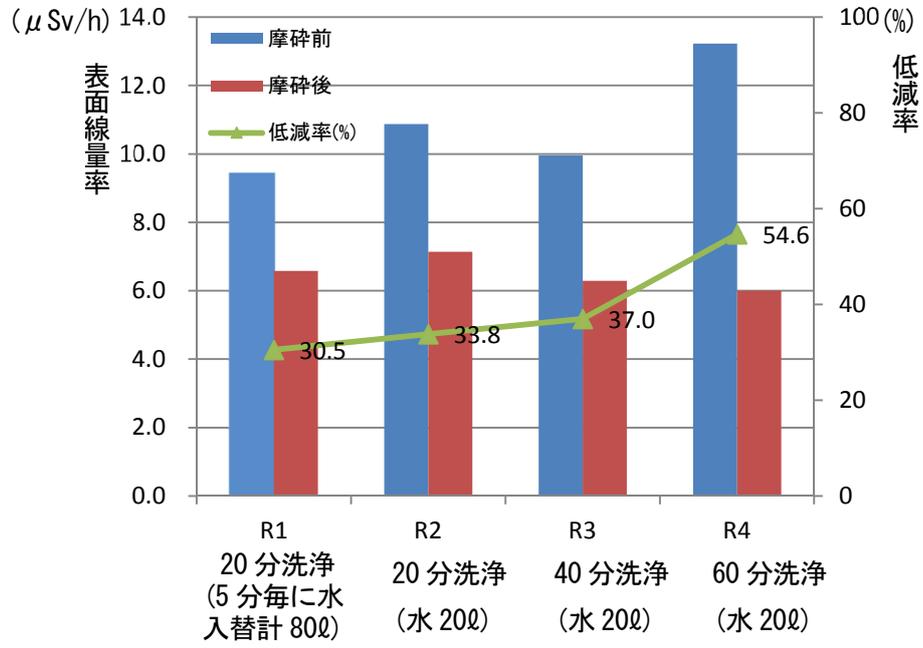


図 2.11 試験前後における表面線量率（リフレ富岡宿泊棟雨だれ部）

表 2.3 表面線量率と低減率の関係

試験モード	採取場所	試験前 ( $\mu\text{Sv/h}$ )		試験後 ( $\mu\text{Sv/h}$ )		低減率 (%)	
		種類平均	モード平均	種類平均	モード平均	種類平均	モード平均
R1	リフレ富岡 屋上	6.9	8.2	4.2	5.4	39.4	34.2
	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	9.4		6.6		30.5	
R2	リフレ富岡 屋上	7.0	8.9	4.3	5.7	38.1	35.9
	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	10.9		7.1		33.8	
R3	リフレ富岡 屋上	6.4	8.2	3.7	5.0	41.6	38.7
	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	10.0		6.3		37.0	
R4	リフレ富岡 屋上	7.3	10.3	2.7	4.4	63.1	57.6
	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	13.2		6.0		54.6	

R1: 砂利 20kg、水 20ℓ、時間 20 分、回転数:150rpm、20 分後に水を排出

R2: 砂利 20kg、水 20ℓ、時間 20 分、回転数:150rpm、5 分毎に水を全量交換

R3: 砂利 20kg、水 20ℓ、時間 40 分、回転数:120rpm、40 分後に水を排出

R4: (R1 の試験後試料を使つての追加試験) 砂利 20kg、水 20ℓ、時間 40 分、回転数:150rpm、40 分後に水を排出。試験後、低減率は、処理時間が 60 分後の値

### (5)-3 研削率

図 2.12 及び表 2.4 に砂利重量と研削率の関係 (砂利重量 20kg) を示した。

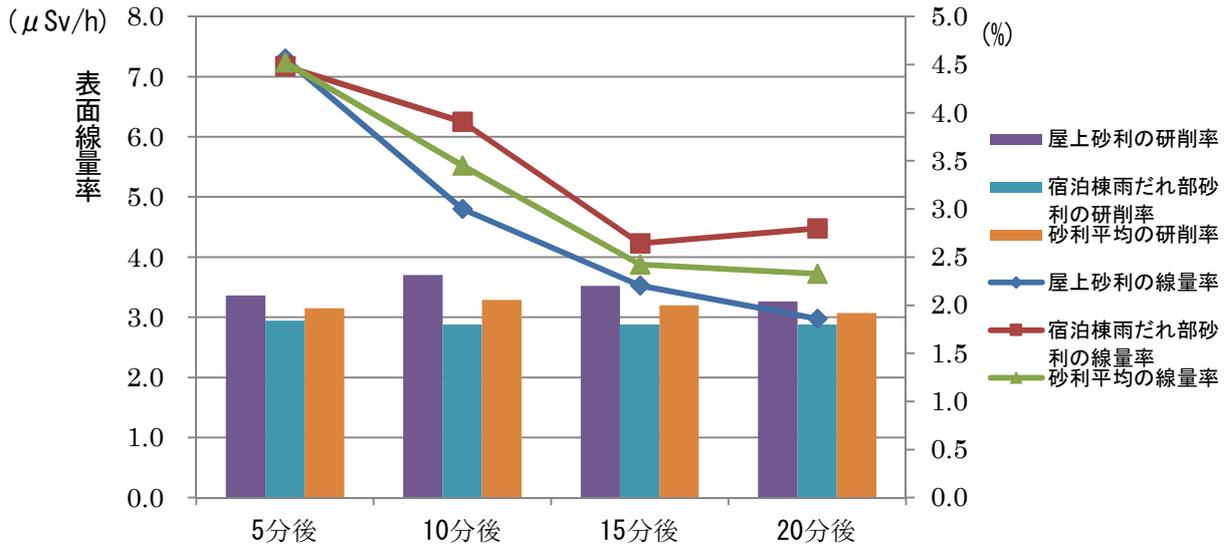


図 2.12 研削物に見る除染効果

表 2.4 表面線量率と研削率の関係

処理時間 (分)	リフレ富岡 屋上		リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部		砂利の平均	
	表面線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )	研削率 (%)	表面線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )	研削率 (%)	表面線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )	研削率 (%)
5	7.3	2.1	7.2	1.8	7.2	2.0
10	4.8	2.3	6.3	1.8	5.5	2.1
15	3.5	2.2	4.2	1.8	3.9	2.0
20	3.0	2.0	4.5	1.8	3.7	1.9

試験モードの R1 (5 分毎に水を全量交換) において、砂利の研削状況及び研削に伴う線量率の低減変化を確認した。処理時間毎の研削率はほぼ一定であることが分かり、一部花崗岩に比べて軟質な堆積岩を含む屋上砂利の方が若干研削率は高かった。また、表面線量率の低減変化では、15 分までは直線的に下がる傾向を示しているが、20 分後の値を見ると低減が鈍くなりつつあるように見える。これは、砂利表面に付着した放射性セシウムが研削物になって除去されていき、徐々に低減効率が悪くなっていくことといえる。

### 2.4.1.3 攪拌羽根式

#### (1) 砂利の種類

砂利の種類は 2.1 項の図 2.1 に示した内の民家を使用した。

#### (2) 使用機械

使用機械は 2.2 項の図 2.3 に示した内のモルタルミキサーを使用した。

(3) 試験方法

砂利の種類及び重量、試験時間を変化させ、除染効果を確認した。  
試験パターンを表 2.5 に、試験フローを図 2.13 に示す。

表 2.5 モルタルミキサー試験パターン

No.	砂利の種類	砂利の重量 (kg)	試験時間(分)					
M-5	民家	20	10	20	30	40	50	60
M-6		40						

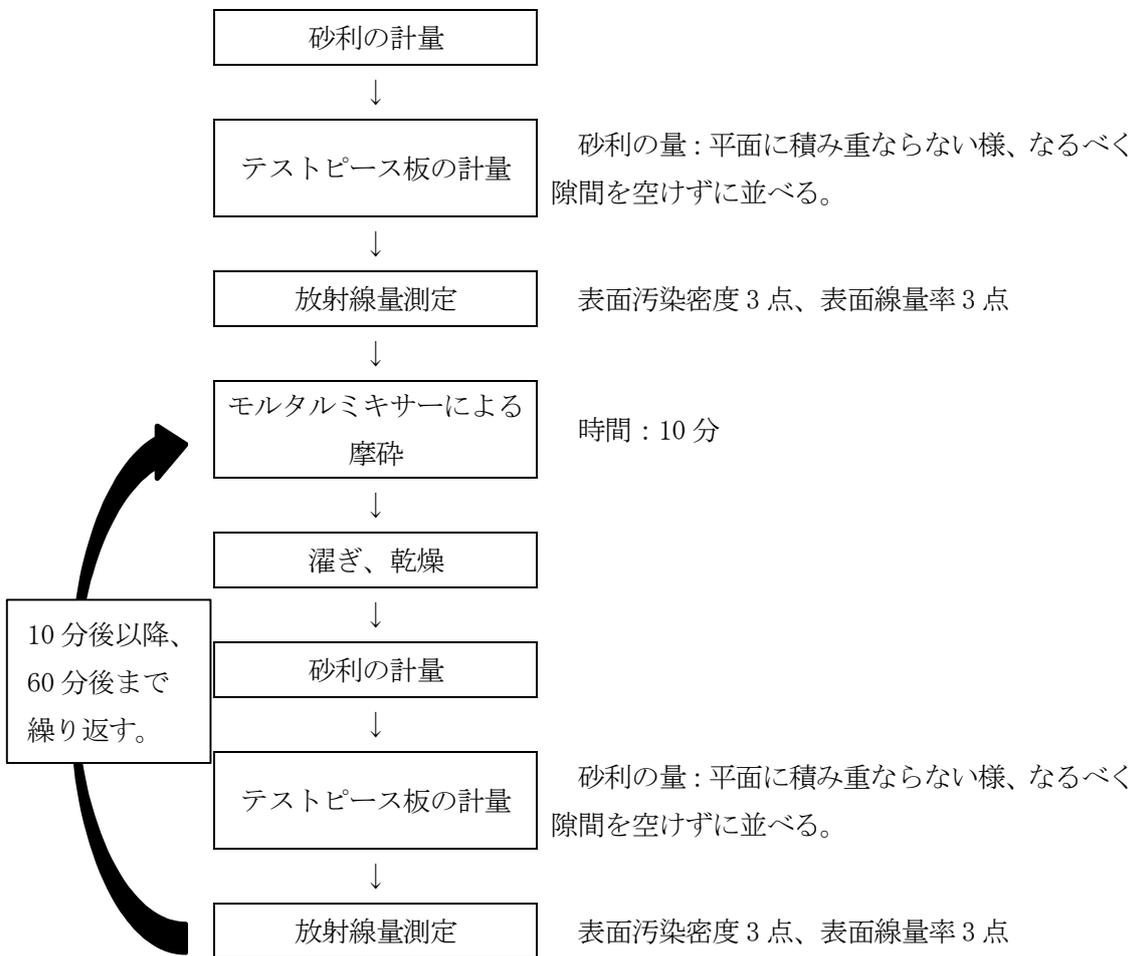


図 2.13 モルタルミキサー試験フロー

試験前測定として砂利の重量と放射線量測定を測定した。測定終了後、砂利と水 20L をモルタルミキサーの中に投入し、摩砕を 10 分間行った。摩砕終了後、砂利をモルタルミキサーの中から取り出し、きれいな水で濯いでから乾燥させ、放射線量測定を行った。測定終了後、砂利をモルタルミキサーに戻して、再度 10 分間摩砕を行い、同様に濯ぎ、乾燥、計量、放射線量測定を、摩砕時間が 60 分になるまで実施した。

試験では、リフレ富岡宿泊棟棟雨だれ部、富岡町役場バス車庫屋上、夜ノ森駅、太田陸前浜街道踏切の4種類についても民家の砂利と同様の条件で行う予定であった。しかし、モルタルミキサーに砂利を充填し攪拌した際に、内部にある攪拌羽根とモルタルミキサー容器の間に砂利が直ぐに噛み込んでしまい(写真2.7)、攪拌ができない状態になった。そのため上記4種類はこの時点でモルタルミキサーでの試験を中止し、民家の砂利除染試験のみを行った。



リフレ富岡



富岡町役場バス車庫屋上



夜ノ森駅



太田陸前浜街道踏切

写真 2.7 砂利の引っ掛かり状況

#### (4) 試験状況

モルタルミキサーの試験状況を写真 2.8 に示す。



水投入



砂利投入

写真 2.8 モルタルミキサーの試験状況



モルタルミキサー運転状況



除染水排出



砂利排出



濯ぎ用洗浄水



濯ぎ



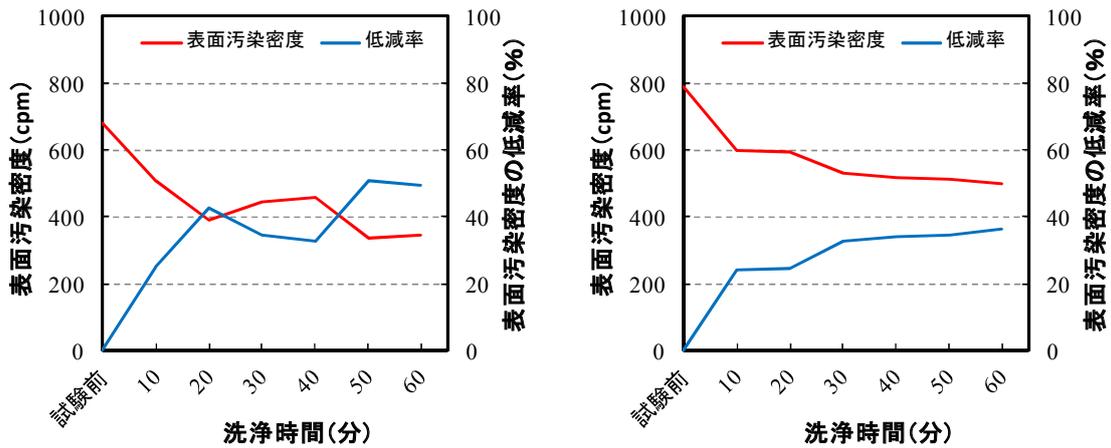
水切り、乾燥

写真 2.8 モルタルミキサーの試験状況(つづき)

(5) 試験結果と考察

(5)-1 表面汚染密度

図 2.14 及び表 2.6 に洗浄時間における表面汚染密度と低減率の関係(砂利重量 20kg、40kg)を示す。



(モルタルミキサー、砂利：民家 左：20kg、右：40kg)

図 2.14 洗浄時間における表面汚染密度と低減率の関係

表 2.6 洗浄時間における表面汚染密度と低減率の関係

(モルタルミキサー、砂利：民家 左：20kg、右：40kg)

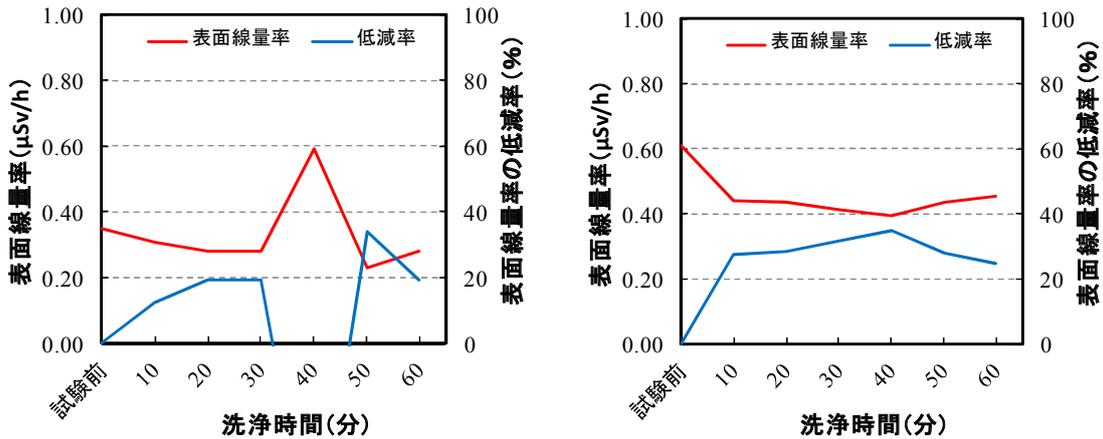
洗浄時間 (分)	表面 汚染密度 (cpm)	低減率 (%)
試験前	683	0
10	511	25
20	390	43
30	446	35
40	460	33
50	335	51
60	345	49

洗浄時間 (分)	表面 汚染密度 (cpm)	低減率 (%)
試験前	788	0
10	597	24
20	594	25
30	530	33
40	519	34
50	515	35
60	501	36

砂利を 20kg または 40kg 投入してモルタルミキサーで攪拌洗浄した民家の砂利は、開始から約 10～20 分までの間に表面汚染密度の大幅な低下を確認した。しかし、それ以降は試験時間を延長しても表面汚染密度の大きな低減はないことが分かった。

(5)-2 表面線量率

図 2.15 及び表 2.7 に洗浄時間における表面線量率と低減率の関係（砂利重量 20kg、40kg）を示した。



(モルタルミキサー、砂利：民家 左：20kg、右：40kg)

図 2.15 洗浄時間における表面線量率と低減率の関係

表 2.7 洗浄時間における表面線量率と低減率の関係

(モルタルミキサー、砂利：民家 左：20kg、右：40kg)

洗浄時間 (分)	表面 線量率 ( $\mu$ Sv/h)	低減率 (%)
試験前	0.35	0
10	0.31	13
20	0.28	19
30	0.28	20
40※1	0.59	-69
50	0.23	34
60	0.28	19

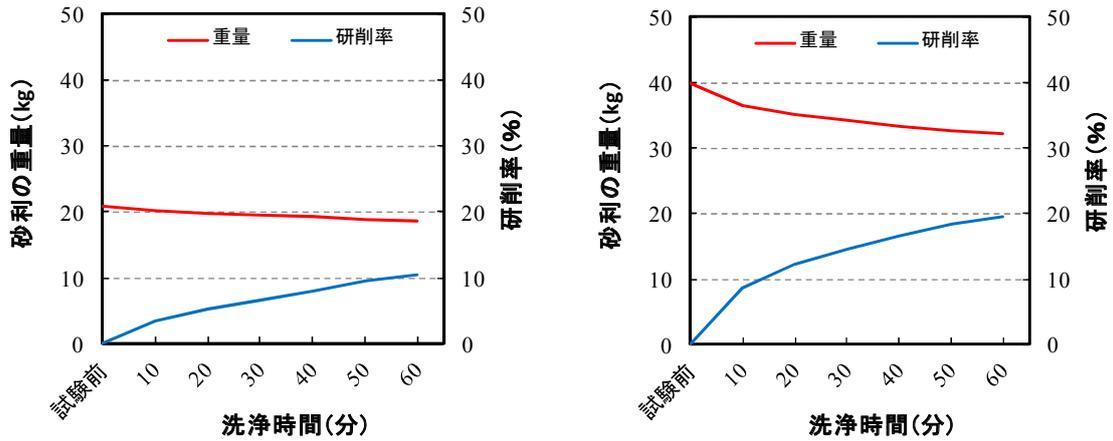
洗浄時間 (分)	表面 線量率 ( $\mu$ Sv/h)	低減率 (%)
試験前	0.61	0
10	0.44	27
20	0.43	29
30	0.41	32
40	0.40	35
50	0.44	28
60	0.46	25

砂利を 20kg または 40kg 投入してモルタルミキサーで攪拌洗浄した民家の砂利は、開始から約 10～20 分までの間に表面線量率の大幅な低下を確認した。しかし、それ以降は試験時間を延長しても表面線量率の大きな低減はないことが分かった。

※1 砂利 20kg の洗浄時間 40 分の測定結果は、テストピース重量の測定ミス（テストピース重量 1.71kg を 2.62kg に誤って計量。）によるものである。

(5)-3 研削率

図 2.16 及び表 2.8 に洗浄時間における砂利重量と研削率の関係（砂利重量 20kg、40kg）を示した。



(モルタルミキサー、砂利：民家 左：20kg、右：40kg)

図 2.16 洗淨時間における砂利重量と研削率の関係

表 2.8 洗淨時間における砂利重量と研削率の関係

(モルタルミキサー、砂利：民家 左：20kg、右：40kg)

洗淨時間 (分)	重量 (kg)	研削率 (%)
試験前	20.88	0
10	20.18	3
20	19.80	5
30	19.49	7
40	19.22	8
50	18.88	10
60	18.68	11

洗淨時間 (分)	重量 (kg)	研削率 (%)
試験前	40.00	0
10	36.57	9
20	35.10	12
30	34.22	14
40	33.35	17
50	32.68	18
60	32.18	20

砂利の研削率を重量 20kg と 40kg で比較すると、各洗淨時間で 40kg の方が約 2 倍大きい値となった。水の投入量が同じであっても砂利の量が多いと共摺り効果が高くなり、その結果、研削率は約 2 倍で増加することを確認した。

#### 2.4.1.4 ポリイオンの効果確認

##### (1) 目的

使用機械のモルタルミキサーにおいて、一番効果の高かった条件（民家の砂利）を用いてポリイオンの添加試験を行い、除染砂利への放射性物質再付着の有無及び砂利と除染水との分離（濯ぎ）具合の確認を行った。

##### (2) 砂利の種類

使用機械は 2.2 節の図 2.3 に示した内の民家を使用した。

##### (3) 使用機械

使用機械は 2.2 節の図 2.3 に示した内のモルタルミキサーを使用した。

##### (4) 試験方法

モルタルミキサーの中に砂利と水及びポリイオンを入れ攪拌羽根を回して除染試験を行い、ポリイオンの効果を確認した。

試験パターンを表 2.9 に、試験フローを図 2.17 に示す。

表 2.9 モルタルミキサー（ポリイオン添加）試験パターン

試験 No.	砂利の種類	砂利の重量 (kg)	試験時間 (分)
M-5-2 ポリイオン無し	民家	20	40
M-5-2 ポリイオン添加			40 (35 分後にポリイオン投入)

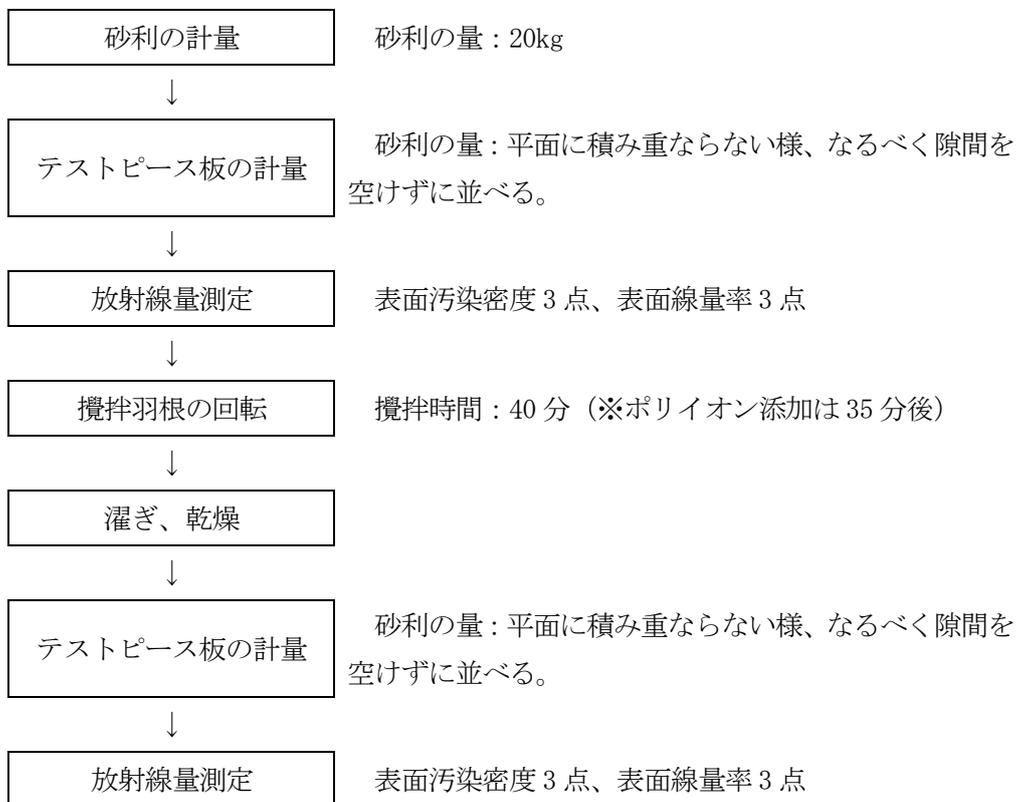


図 2.17 モルタルミキサー（ポリイオン添加）試験フロー

試験前測定として砂利の重量と放射線量を測定した。測定終了後、砂利と水 20L をモルタルミキサーの中に投入し、攪拌羽根を 40 分間回転させた。

ポリイオン添加試験の場合は、攪拌開始 35 分後にポリイオンを 1L 投入した。

攪拌終了後、砂利をモルタルミキサーの中から取り出し、きれいな水で濯いでから乾燥させ、放射線量測定を行った。

#### (5) 試験状況

試験状況を写真 2.9 に示す。



ポリイオン



モルタルミキサー運転状況



ポリイオン投入



除染水分離状況

写真 2.9 モルタルミキサー（ポリイオン添加）の試験状況

(6) 試験結果と考察

ポリイオン添加試験結果を表 2.10 に示す。

表 2.10 ポリイオン添加試験結果

No. M-5-2	ポリイオン無し		ポリイオン添加	
	試験前	試験後	試験前	試験後
表面汚染密度 [cpm]	683±33	396±62	541±47	360±59
表面線量率 [μSv/h]	0.39±0.02	0.26±0.04	0.28±0.02	0.23±0.06

先ず、ポリイオン添加の有無による試験状況を述べると、ポリイオンを添加しない試験では、除染水中の研削した粒子が細かく固液分離しないため、砂利の濯ぎ水が透明になるまで時間が多くかかった。一方、ポリイオンを添加した試験では、攪拌を停止すると直ぐに凝集して固液分離が始まったため、砂利の濯ぎ作業時間もポリイオンを添加しない場合に比べ半分以下になり容易であった。

ポリイオンを添加した試験の結果、試験前後の砂利の表面汚染密度、表面線量率をみると、ポリイオンを添加しない場合と比較しても有意な差はなかった。そこで、ポリイオンによって除染砂利への放射性物質再付着防止をより具体的に確認するために、試験前後の砂利の放射能濃度を追加測定した。また、排出した除染水の上澄み液も採取（写真 2.10）して放射能濃度を測定した。放射能濃度測定結果を表 2.11 に示す。



ポリイオン無し

ポリイオン添加

上澄み液採取検体

写真 2.10 除染水上澄み液採取状況

表 2.11 ポリイオン添加放射能濃度測定結果

No. M-5-2	試験前	試験後			
		ポリイオン無し		ポリイオン添加	
	砂利	砂利	除染水上澄み液	砂利	除染水上澄み液
放射能濃度 [Bq/kg]	37750	19350	13100	20350	73

放射能濃度の測定結果から、試験前後の砂利の放射能濃度を比較すると、ポリイオンを添加しない場合とほぼ変わらない（約 20,000Bq/kg）ことから、ポリイオン添加の有無に関わらず、再付着が無いことが分かった。

しかし、試験後の除染水上澄み液の放射能濃度を比較すると、ポリイオン添加の方が凝集沈殿により水と研削物の固液分離効果が現れる。このことから、ポリイオン添加することにより、モルタルミキサーの機械性能（攪拌）を活かした凝集効果を発揮し、濯ぎ工程において砂利との分離がしやすく、除染水における水処理工程の短縮と使用する水の量を抑えることができるメリットがあることも分かった。

## 2.4.2 キャビテーション方式

キャビテーション方式では、超音波の振動で小さな気泡を発生させ、砂利に当たって気泡が壊れるときの衝撃波で表面の汚れなどを引きはがす。

超音波洗浄槽の中に一定量の砂利と水を入れ、キャビテーション効果の高い周波数（28kHz、40kHzの併用）および環境中への影響が少ない酸や洗浄剤を用いて実施した。

### 2.4.2.1 砂利の種類

砂利は、2.1節の図 2.1 に示した内のリフレ富岡屋上及びリフレ富岡宿泊棟雨だれ部を使用した。

### 2.4.2.2 使用機械

使用機械は2.2節の図 2.3 に示した超音波洗浄機を使用した。

### 2.4.2.3 試験方法

超音波洗浄機の中に2kgの砂利と10Lの水を入れ、砂利が動かないよう静置して実施した。

試験パターンを表 2.12 に、試験フローを図 2.18 に示す。

表 2.12 超音波洗浄機試験パターン

No.	砂利の種類	研磨条件	砂利の重量	試験時間
1	リフレ富岡 屋上	水のみ(摩砕済み)	2kg	120分
		水のみ		
		クエン酸(2wt%)		
		洗浄剤(0.2wt%)		
2	リフレ富岡宿泊棟 雨だれ部	水のみ(摩砕済み)		
		水のみ		
		クエン酸(2wt%)		
		洗浄剤(0.2wt%)		

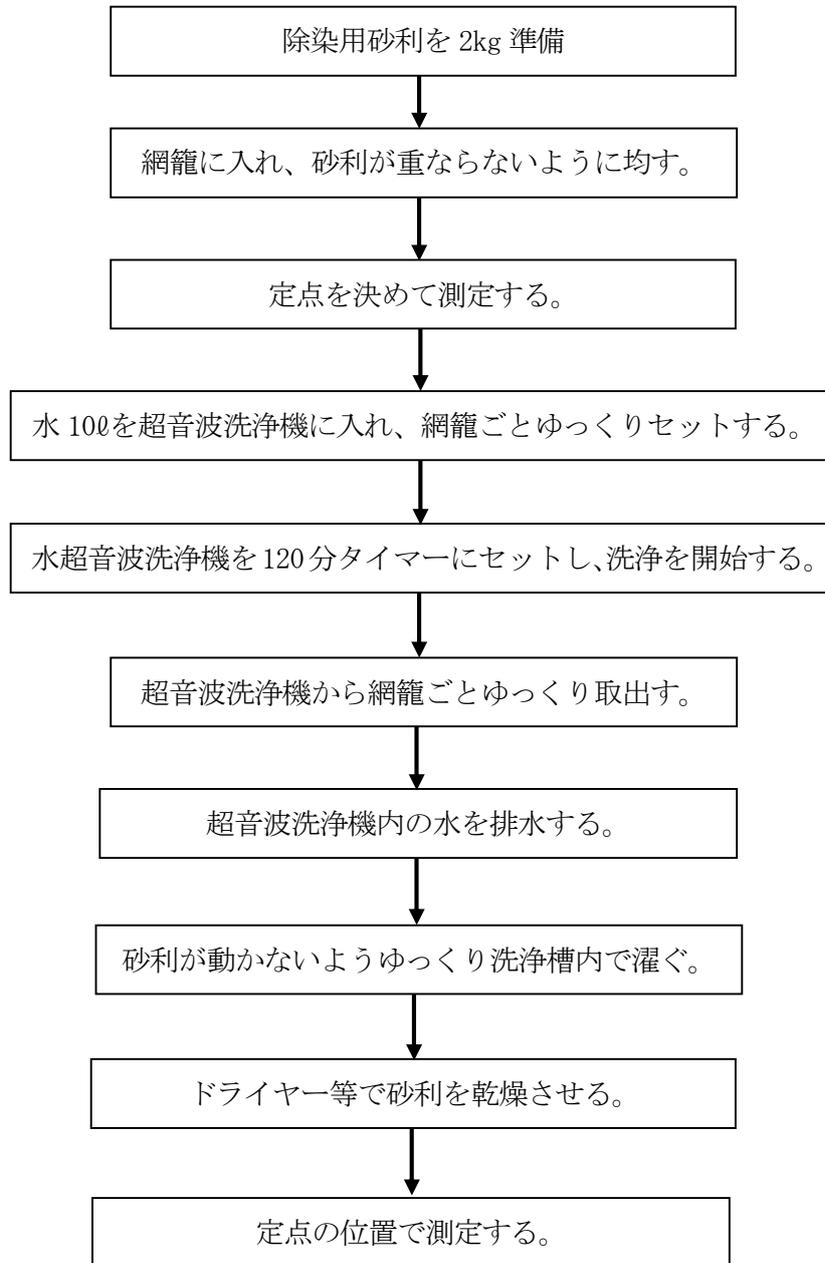


図 2.18 超音波洗浄機試験フロー

試験前測定として、網籠に入れて砂利の重量と放射線量を測定した。測定終了後、砂利が動かないよう網籠ごと超音波洗浄機の中に投入し、除染効果を見極めるため模擬試験の 60 分に対し、2 倍の時間（120 分間）で運転した。運転し終わった後、砂利を動かさないように超音波洗浄機の中から取り出し、きれいな水で濯いでから乾燥させ、放射線量測定を行った。

### 2.4.2.4 試験状況

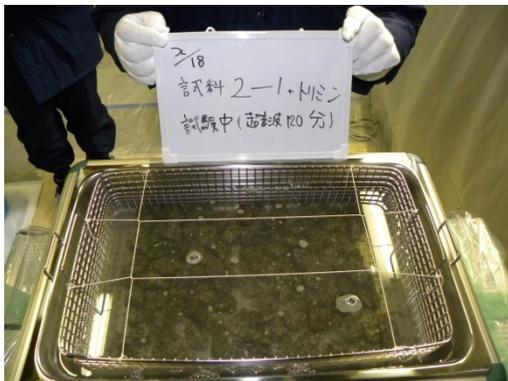
試験状況を写真 2.11 に示す。



定点を決めて試験前測定



試験開始



試験終了(120分後)



試験後の槽内状態



砂利の濯ぎ



試験後測定

写真 2.11 超音波洗浄機の試験状況

(1) 表面汚染密度

図 2.19～21 及び表 2.13 に表面汚染密度と低減率の関係（砂利重量 20kg）を示す。

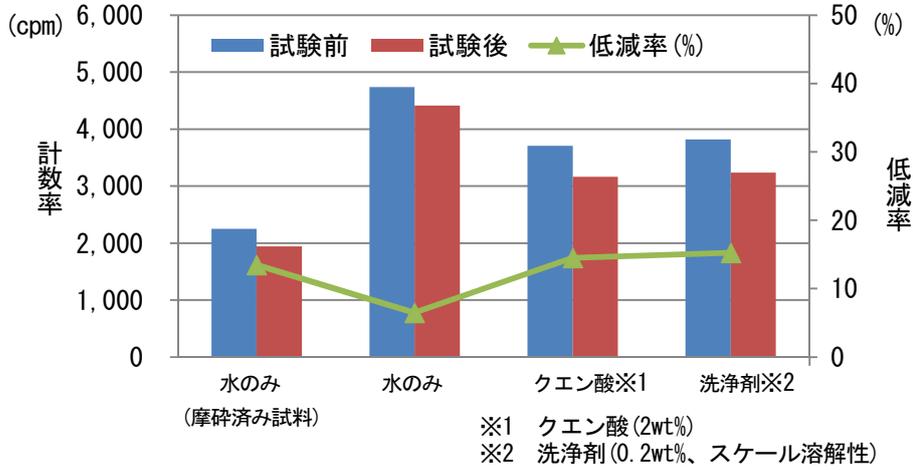


図 2.19 試験前後における表面密度（リフレ富岡屋上と宿泊棟雨だれ部の平均）

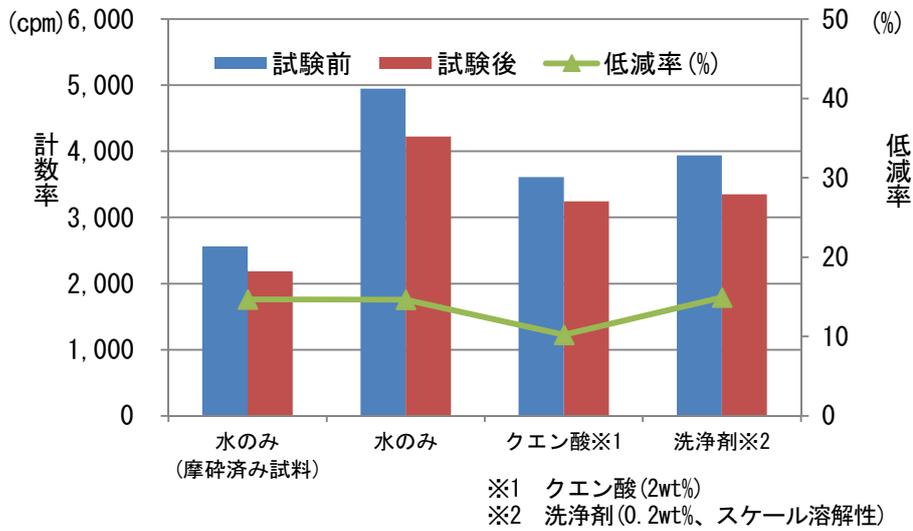


図 2.20 試験前後における表面密度（リフレ富岡屋上）

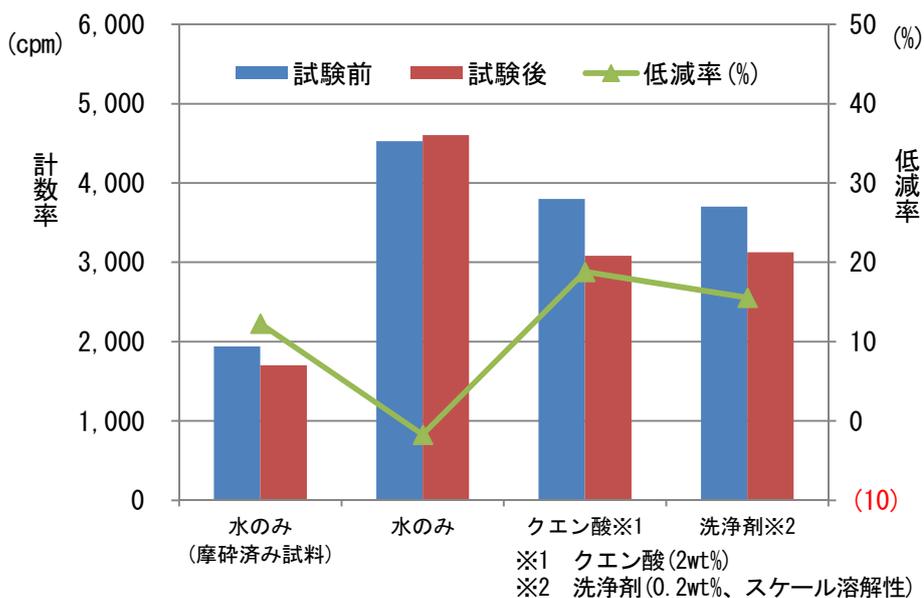


図 2.21 試験前後における表面密度 (リフレ富岡宿泊棟雨だれ部)

表 2.13 表面汚染密度と低減率の関係

種 類	採取場所	試験前 (kcpm)	試験後 (kcpm)	低減率 (%)
水のみ (摩砕済み)	リフレ富岡 屋上	2.56	2.19	14.7
	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	1.94	1.70	12.3
水のみ	リフレ富岡 屋上	4.95	4.23	14.6
	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	4.53	4.60	-1.7
クエン酸 (2wt%)	リフレ富岡 屋上	3.61	3.24	10.2
	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	3.80	3.08	18.8
洗剤 (0.2wt%)	リフレ富岡 屋上	3.94	3.35	14.9
	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	3.70	3.13	15.5

リフレ富岡の宿泊棟雨だれ部の砂利は全て花崗岩であるのに対し、屋上の砂利には堆積岩が混じっている。この二種類の砂利の低減率を見比べると、堆積岩が混じっている屋上の砂利の方が若干ではあるが除染効果が高いことが分かった。

(2) 表面線量率

図 2.22 及び表 2.14 に表面線量率と低減率の関係（砂利重量 20kg）を示す。  
結果は、表面密度と同じ結果であった。

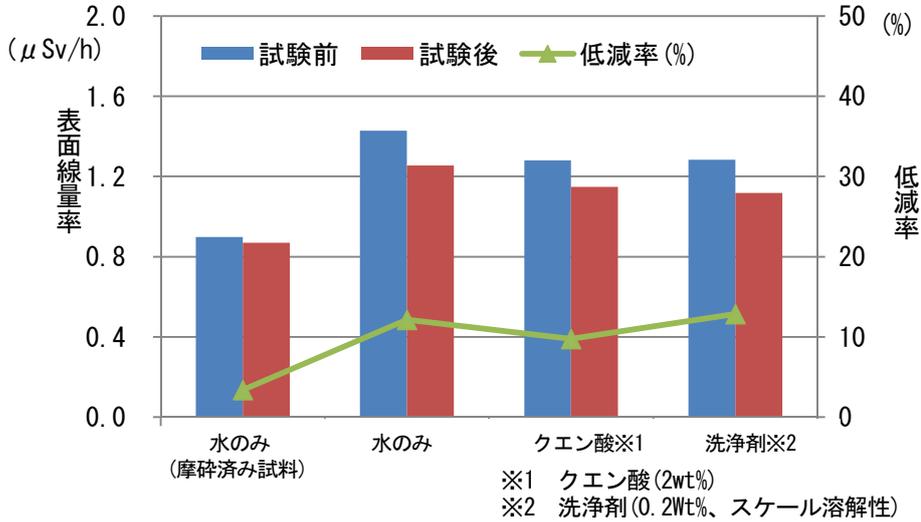


図 2.22 試験前後における表面線量率

表 2.14 試験前後における表面線量率

種 類	採取場所	試験前 (μSv/h)	試験後 (μSv/h)	低減率 (%)
水のみ (摩砕済み)	リフレ富岡 屋上	0.85	0.81	4.7
	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	0.95	0.93	2.1
水のみ	リフレ富岡 屋上	1.31	1.15	12.5
	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	1.54	1.36	11.8
クエン酸 (2wt%)	リフレ富岡 屋上	1.08	1.00	6.9
	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	1.48	1.29	12.7
洗浄剤 (0.2wt%)	リフレ富岡 屋上	1.24	1.11	10.3
	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	1.33	1.12	15.4

(3) 放射能濃度

図 2.23 及び表 2.15 に除染後回収水の放射能濃度を示す。

堆積岩が混じっている屋上の砂利の方が宿泊棟雨だれ部より除染後回収水の放射能濃度が高く、表面汚染密度および表面線量率の結果と整合する。

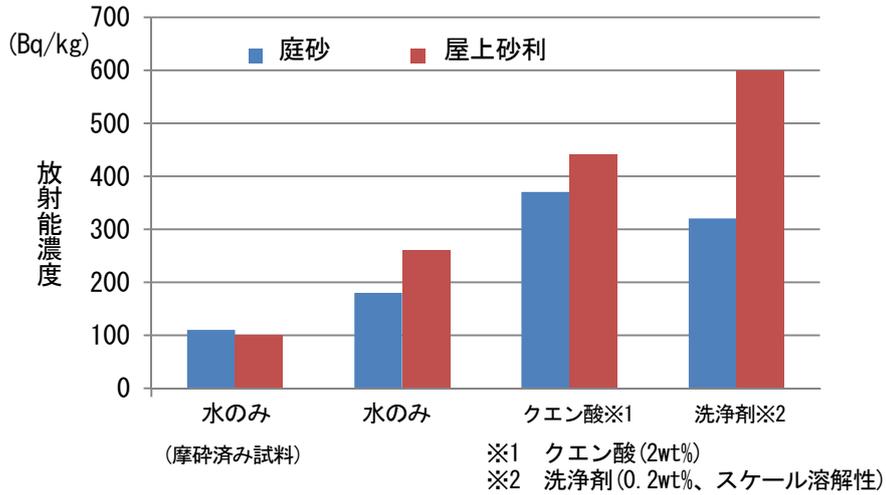


図 2.23 除染後回収水の放射能濃度

表 2.15 除染後回収水の放射能濃度

採取場所	水のみ (摩砕済み) (Bq/L)	水のみ (Bq/L)	クエン酸 (2wt%) (Bq/L)	洗剤 (0.2wt%) (Bq/L)
リフレ富岡 屋上	100	260	440	600
リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	110	180	370	320

### 2.4.2.5 分布状態

回収した研削物の放射性セシウムの分布状態を写真 2.12 に示す。

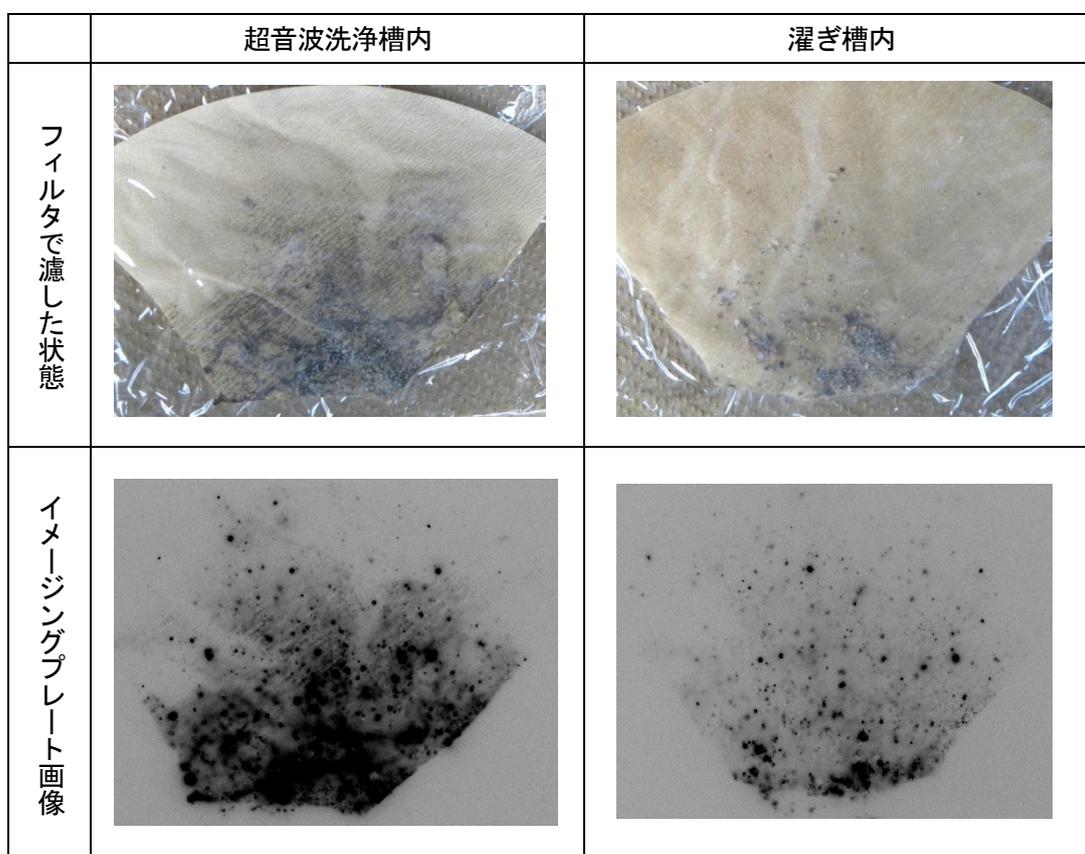


写真 2.12 放射性セシウムの付着状態

超音波洗浄方式では、事前に砂利を濯ぎ表面に付着した汚れを落としてから槽に入れ、水のみ・クエン酸・洗浄剤の条件で各 120 分間かけて試験を行い、表面線量率を測定した結果、除染前が 1.3～1.5  $\mu\text{Sv/h}$  であったのに対し、除染後が 1.1～1.4  $\mu\text{Sv/h}$  になり、低減率は洗浄剤を使用した条件が最も良く 15% になった。

キャビテーションにより、槽内が濁る位に砂利の表面を削る効果はあったが、線量率が大きく低減するほどの除染効果はなく実用的ではないことが分かった。超音波洗浄方式は、形状が複雑な対象物を除染する必要がある場合に適していると思われる。

### 2.4.3 ブラスト方式

ブラスト方式では、砂利に固体や液体を投射し表面を削ることで高い除染効果を得る可能性がある。その条件として、立体状の砂利が投射物の衝撃を受けられること、砂利全面に投射物が当たるようにすることが必要である。また、周囲へ研削物や飛沫等の飛散防止対策が必要である。

試験は、研磨材を投射するウェットブラストおよび高圧水を投射する洗浄機を用いた。ウェットブラストは密閉式の装置で行い、高圧水洗浄は圧力を 20MPa（高圧）と 280MPa（超高压）の 2 種類とし、それぞれモルタルを練るミキサーを回転させ槽内を排気しながら実施した。

#### 2.4.3.1 ウェットブラスト

##### (1) 砂利の種類

砂利は、2.1 節の図 2.1 に示した砂利を使用した。

##### (2) 使用機械

使用機械は 2.2 節の図 2.3 に示した内のウェットブラストを使用した。

##### (3) 試験方法

砂利をテストピース板に固定し、その表面及び裏面からウェットブラストで洗浄して除染試験を行った。砂利の種類及び研磨材の種類、試験時間を変化させ、除染効果を確認した。研磨材の種類は、アルミナ小粒径（粒度 F60）、アルミナ大粒径（粒度 F46）を使用した。

試験パターンを表 2.16 に示す。試験フローを図 2.24 に示す。

表 2.16 ウェットブラストの試験パターン

No.	砂利の種類	研磨材の種類	試験時間(片面) (分)	
			1	3
U-1	リフレ富岡宿泊棟雨だれ部	小粒径	1	3
U-2		大粒径		
U-3	富岡町役場バス車庫屋上	小粒径		
U-4		大粒径		
U-5	民家	小粒径		
U-6		大粒径		
U-7	夜ノ森駅	小粒径		
U-8		大粒径		
U-9	太田陸前浜街道踏切	小粒径		
U-10		大粒径		

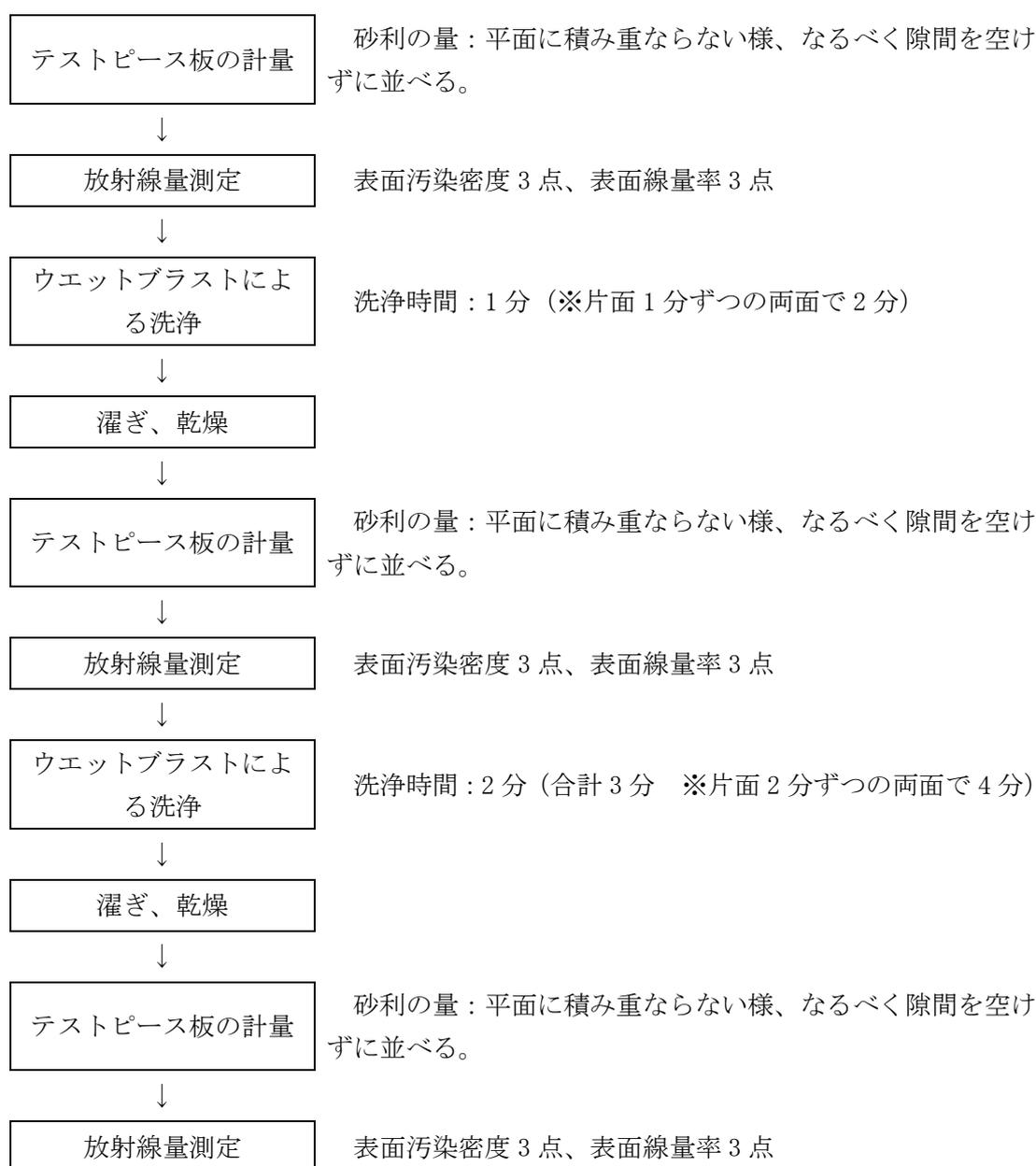


図 2.24 ウェットブラスト試験フロー

試験前測定としてテストピース板の重量と放射線量を測定した。測定終了後、テストピース板をウェットブラスト装置の中に設置し、ウェットブラストで片面 1 分ずつ（両面で計 2 分）洗浄した。洗浄し終わった後、テストピース板をウェットブラスト装置の中から取り出し、きれいな水で濯いでから乾燥させ、放射線量測定を行った。測定終了後、テストピース板をウェットブラスト装置に戻して、再度片面 2 分ずつ（両面で計 4 分）洗浄し、同様に濯ぎ、乾燥、計量、放射線量測定を順に実施した。

(4) 試験状況

ウェットブラストの試験状況を写真 2.13 に示す。



テストピース板設置（表面）



テストピース板設置（裏面）



研磨材：アルミナ、粒度 F60（小粒径）



研磨材：アルミナ、粒度 F46（大粒径）



洗浄作業（小粒径）



洗浄作業（大粒径）



濯ぎ



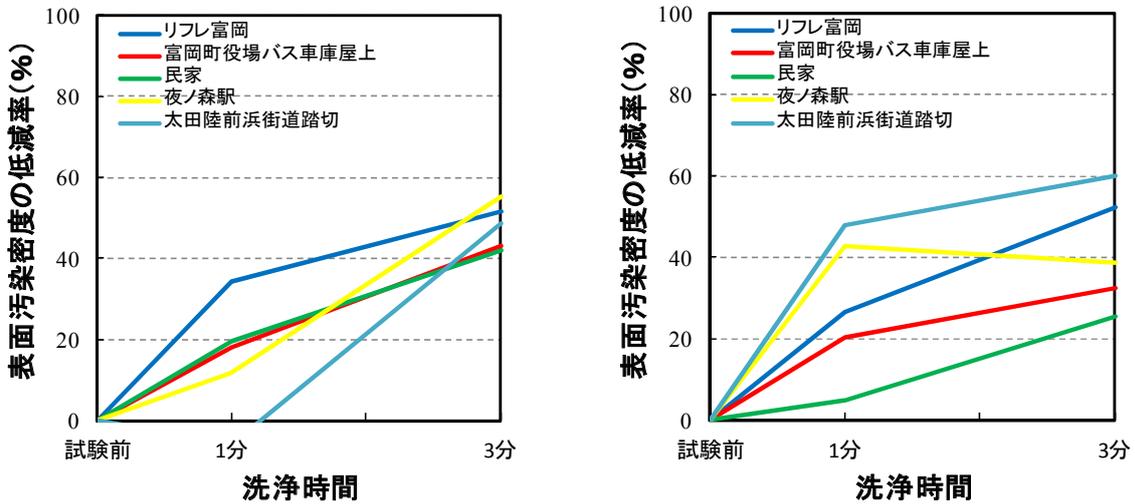
水切り、乾燥

写真 2.13 ウェットブラストの試験状況

(5) ウェットブラストを使用した試験結果

(5)-1 表面汚染密度

図 2.25 及び表 2.17 にウェットブラストを使用した洗浄時間における表面汚染密度と低減率の関係（研磨材 小粒径、大粒径）を示す。



(左:小粒径、右:大粒径)

図 2.25 洗浄時間における表面汚染密度と低減率の関係

表 2.17 洗浄時間における表面汚染密度と低減率の関係

砂利の種類	単位	表面汚染密度					
		小粒径			大粒径		
		試験前	1分	3分	試験前	1分	3分
リフレ富岡宿泊棟 雨だれ部	cpm	3573	2344	1729	2883	2121	1371
	低減率 (%)	0	34	52	0	26	52
富岡町役場 バス車庫屋上	cpm	1140	936	647	941	749	637
	低減率 (%)	0	18	43	0	20	32
民家	cpm	577	465	335	647	616	482
	低減率 (%)	0	19	42	0	5	26
夜ノ森駅	cpm	1626	1433	729	1838	1055	1126
	低減率 (%)	0	12	55	0	43	39
太田陸前浜 街道踏切	cpm	543	575	280	436	228	174
	低減率 (%)	0	-6	48	0	48	60

本試験で使用したウェットブラストは研磨材を選択して噴射できることから、研磨材の種類アルミナ小粒径（粒度 F60）、アルミナ大粒径（粒度 F46）の違いを検証した。

表面汚染密度の結果については、小粒径の洗浄時間3分で似通った低減率が得られたが全体的に低減率にバラつきが見られた。

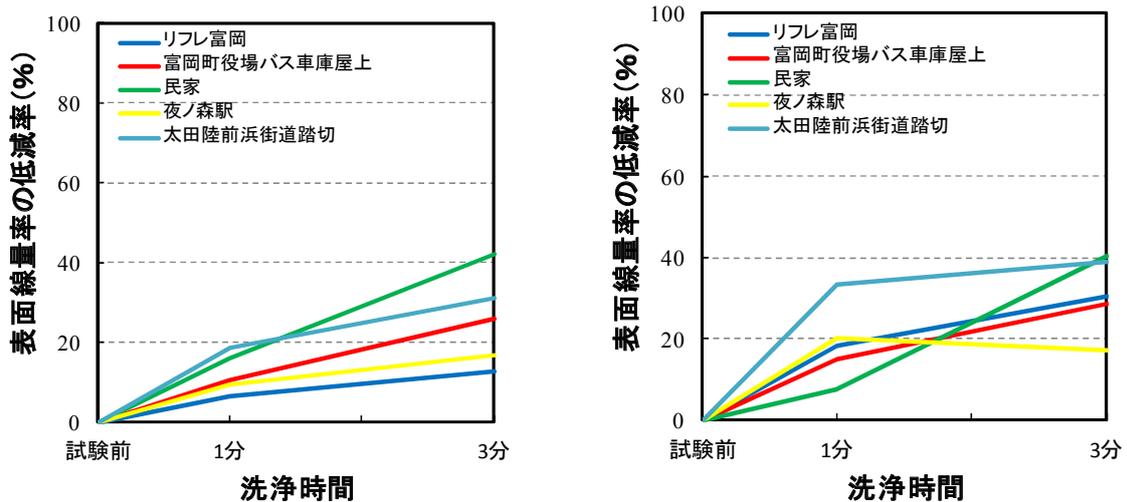
これは、砂利をテストピース板に固定して平面的に洗浄を行った結果、一つ一つの石に対して洗浄できなかった部分「洗浄ムラ」が残ること、元々、砂利の上下面の汚染レベルにバラつきがあること、それに加えて、局所的に測定を行う表面汚染密度の測定方法等に影響したものと考えられる。

また、砂利が洗浄水の圧力により吹き飛ばされ、砂利の面に洗浄水が当たっていない可能性もあると考えられる。

研磨材のアルミナ小粒径及び大粒径による明らかな除染効果の違いは認められず、砂利全面に当たる工夫と適正な洗浄時間を得るための試験が必要である。

(5)-2 表面線量率

図 2.26 及び表 2.18 にウェットブラストを使用した洗浄時間における表面線量率と低減率の関係（研磨材 小粒径、大粒径）を示した。



(左:小粒径、右:大粒径)

図 2.26 洗浄時間における表面線量率と低減率の関係

表 2.18 洗浄時間における表面線量率と低減率の関係

砂利の種類	単位	表面線量率					
		小粒径			大粒径		
		試験前	1分	3分	試験前	1分	3分
リフレ富岡宿泊棟 雨だれ部	$\mu\text{Sv/h}$	1.58	1.48	1.38	1.54	1.26	1.07
	低減率 (%)	0	6	13	0	18	31
富岡町役場 バス車庫屋上	$\mu\text{Sv/h}$	0.66	0.59	0.49	0.66	0.56	0.47
	低減率 (%)	0	11	26	0	15	29
民家	$\mu\text{Sv/h}$	0.31	0.26	0.18	0.52	0.48	0.31
	低減率 (%)	0	16	42	0	8	40
夜ノ森駅	$\mu\text{Sv/h}$	0.42	0.38	0.35	0.64	0.51	0.53
	低減率 (%)	0	10	17	0	20	17
太田陸前浜 街道踏切	$\mu\text{Sv/h}$	0.16	0.13	0.11	0.18	0.12	0.11
	低減率 (%)	0	19	31	0	33	39

表面線量率の結果については、全体的に低減率にバラつきが見られた。

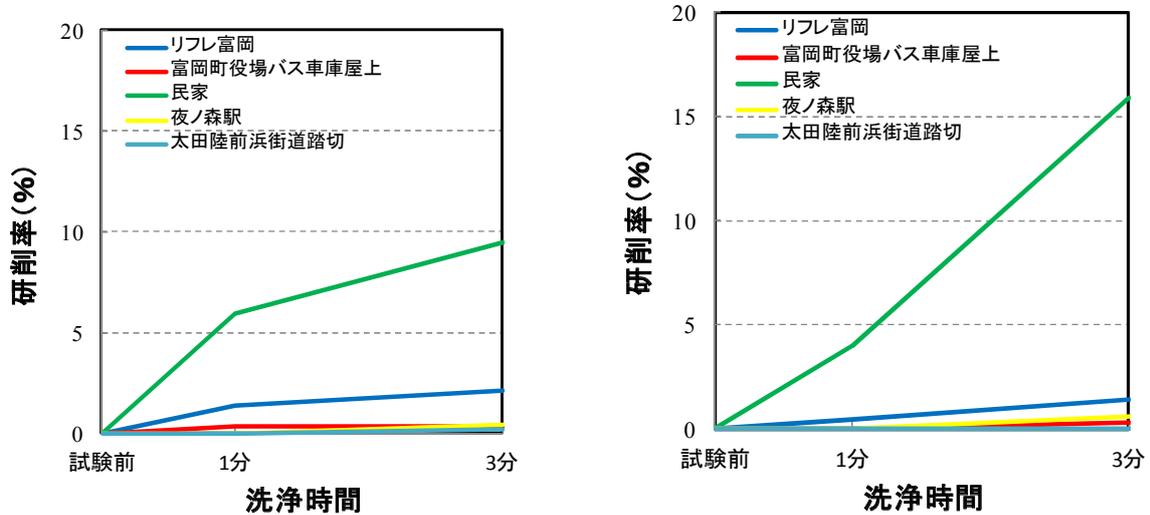
これは、砂利をテストピース板に固定して平面的に洗浄を行った結果、一つ一つの石に対して洗浄できなかった部分「洗浄ムラ」が残ること、元々、砂利の上下面の汚染レベルにバラツキがあること、それに加えて、局所的に測定を行う表面汚染密度の測定方法等に影響したものと考えられる。

また、砂利が洗浄水の圧力により吹き飛ばされ、砂利の面に洗浄水が当たっていない可能性もあると考えられる。

研磨材のアルミナ小粒径及び大粒径による明らかな除染効果の違いは認められず、砂利全面に当たる工夫と適正な洗浄時間を得るための試験が必要である。

(5)-3 研削率

図 2.27 及び表 2.19 にウェットブラストを使用した洗浄時間における研削率の関係（研磨材：小粒径、大粒径）を示す。



(左:小粒径、右:大粒径)

図 2.27 洗浄時間における研削率の関係

表 2.19 洗浄時間における研削率の関係

砂利の種類	単位	砂利の重量					
		小粒径			大粒径		
		試験前	1分	3分	試験前	1分	3分
リフレ富岡宿泊棟 雨だれ部	kg	5.11	5.04	5.00	4.25	4.23	4.19
	研削率 (%)	0.00	1.37	2.15	0.00	0.47	1.41
富岡町役場 バス車庫屋上	kg	2.75	2.74	2.74	3.00	3.00	2.99
	研削率 (%)	0.00	0.36	0.36	0.00	0.00	0.33
民家	kg	1.69	1.59	1.53	2.01	1.93	1.69
	研削率 (%)	0.00	5.92	9.47	0.00	3.98	15.92
夜ノ森駅	kg	4.83	4.83	4.81	5.14	5.14	5.11
	研削率 (%)	0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	0.58
太田陸前浜 街道踏切	kg	4.88	4.88	4.87	4.93	4.93	4.93
	研削率 (%)	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00

研削率の結果については、民家の砂利が他の砂利に比べて高い研削率を示した。

しかし、後述する高圧水洗浄機及び超高圧水洗浄機の結果と同様に民家の石は粒径が数mm程度と他の石に比べて小さいことから、テストピース板で固定しても洗浄水の噴射圧力や水流または研磨材によりテストピースが破損し、石が動いて移動しただけ、また、網目より小さい石がテ

トピースの網目から抜け出たため、除染効果でみる研削とは異なるを考える。

これらの結果から、実際の研削率は民家以外の砂利のように洗浄時間 3 分で数%以下であり、研磨材のアルミナ小粒径及び大粒径による研削量の違いは無視できるレベルだと考える。

#### (6) 考察

ウェットブラストについて、砂利の種類での試験結果は、後述する高圧水洗浄機及び超高压水洗浄機と同様に民家の粒径が数ミリ程度の小さな砂利は洗浄水の噴射圧力や水流または研磨材によって飛び散りが発生することが分かった。

また、除染対象となる砂利を固定して洗浄を行った場合、砂利の一部が洗浄されていない「洗浄ムラ」が残り、安定した測定値を得ることができなかった。なお、バラツキには砂利自体の汚染レベルのバラツキも関係がある。

研磨材アルミナの大小の違いによる除染効果を比較した場合、除染効果の差はほとんどみられなかった。

これらの結果より、噴射圧力を利用するウェットブラストを使用した砂利の除染については、粒径が数ミリ程度の小さな砂利は飛び散りが発生するため使用機械として向いていない。また、砂利の粒径（1cm 以上）が大きく、多角形であるものは、砂利の全面に研磨材を当てられる工夫が必要である。

### 2.4.3.2 高圧水・超高压水による立体洗浄

#### (1) 砂利の種類

砂利は、2.1 節の図 2.1 に示した砂利の内、リフレ富岡宿泊棟雨だれ部、夜ノ森駅及び富岡町役場バス車庫屋上を使用した。なお、粒径が小さい民家の砂利は水圧で飛び散ってしまうこと、及び太田陸前浜街道踏切のバラストは夜ノ森駅のバラストで代用できることから本試験の対象外とした。

#### (2) 使用機械

使用機械は 2.2 節の図 2.3 に示した内の高圧水洗浄機、超高压水洗浄機の 2 種類及びポットミキサーを使用した。

#### (3) 試験方法

ポットミキサーと高圧及び超高压水洗浄機を組み合わせ、ミキサー内の砂利を攪拌しながら水の圧力を変えて洗浄した。

試験パターンを表 2.20 に、試験フローを図 2.28 に示す。

表 2.20 立体洗浄法を用いた除染効果試験パターン

試験 No.	使用機械	砂利の種類	試験時間 (分)
R-0	ポットミキサー	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	8
Y-0		夜ノ森駅	
B-0		富岡町役場バス車庫屋上	
R-1	ポットミキサー ＋ 高圧水洗浄機	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	
Y-1		夜ノ森駅	
B-1		富岡町役場バス車庫屋上	
R-2	ポットミキサー ＋ 超高压水洗浄機 (100MPa)	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	
Y-2		夜ノ森駅	
B-2		富岡町役場バス車庫屋上	
R-3	ポットミキサー ＋ 超高压水洗浄機 (200MPa)	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	
Y-3		夜ノ森駅	
B-3		富岡町役場バス車庫屋上	

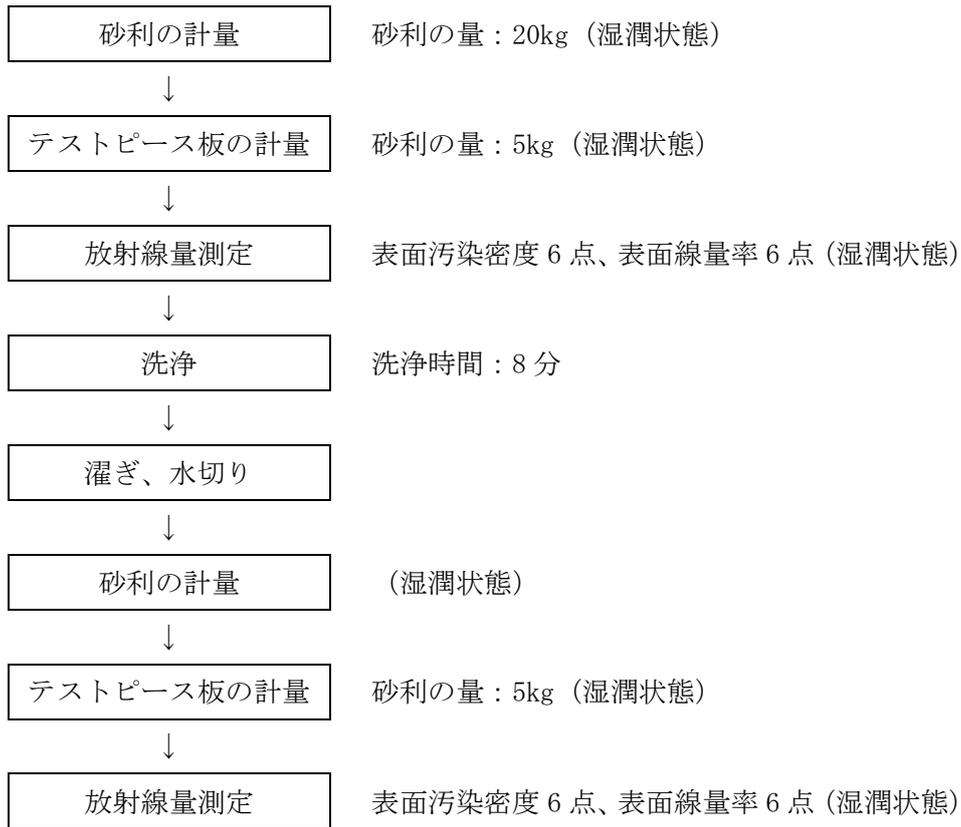


図 2.28 立体洗浄法を用いた除染効果試験フロー

砂利を水で濡らしてから、試験前測定として砂利の重量及び放射線量測定用テストピース板の重量と放射線量を測定した。測定終了後、テストピース板の砂利を戻し、全体量が 20kg の砂利をポットミキサーに充填した。さらにポットミキサー内にこぼれない程度に水を充填した。高圧及び超高圧水洗浄機を使用する場合は、ハンドガンセットし、砂利にハンドガンのノズルから噴出した水が十分に当たるように調整をした。

調整完了後、ポットミキサーを運転しながら洗浄を行い、【立体的】な除染効果の確認を行った。具体的には、砂利の攪拌状態を阻害せず、万遍に当たるようハンドガンの向きを調整した。試験時間は重量換算で平面洗浄法（約 5kg）の 1 分/片面に相当する 8 分とした。洗浄終了後、ポットミキサーから砂利を取り出してきれいな水で濯ぎ、軽く水を切った状態で砂利全体の重量及び放射線量測定用テストピース板の重量と放射線量を測定した。

#### (4) 試験状況

試験に当たって、放射線量測定方法を以下のように行った。

テストピース板に砂利 5kg を平面に積み重ならないように、なるべく隙間を空けずに並べ、鉛直方向高さ 1cm の位置で測定器の検出器を保持し、鉛のコリメータ及び鉛板で周囲を遮蔽して測定を行った。測定箇所はバラツキを考慮して、写真 2.14 の①～⑥の 6 点とした。

測定方法は、測定器のスイッチを入れ、時定数 10 で 30 秒後に数値を読み取り始め、10 秒ごとに計 5 回数値を読み取った。読み取り数値が大きくバラつく場合は、安定した 5 回の数値を読

み取った。さらに、①～⑥の6点の測定値の平均値を算出して、砂利の放射線量を決定した。

測定器は、GM 計数管式サーベイメータ (TGS-146B 日立アロカメディカル株式会社製) 及び NaI シンチレーション式サーベイメータ (TCS-172B 日立アロカメディカル株式会社製) を使用した。試験状況を写真 2.14～15 に示す。



写真 2.14 テストピース板及び放射線量測定位置



砂利重量測定 (試験前)



線量測定用重量 5kg 測定 (試験前)



砂利投入



試験状況 (高圧水洗浄機)

写真 2.15 立体洗浄法の試験状況 (1/2)



試験状況（超高压水洗浄機）



砂利排出



濯ぎ



水切り（エア一吹き）



砂利重量測定（試験後）



放射線量測定用重量 5kg 測定（試験後）

写真 2.15 立体洗浄法の試験状況(2/2)

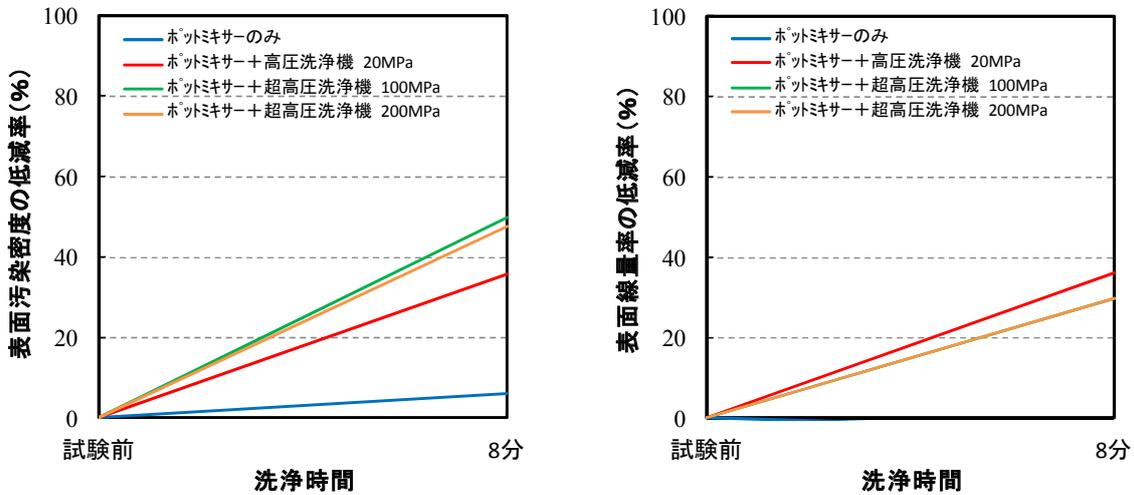
### (5) 高压水・超高压水を使用した試験結果

各種砂利及び各種使用機械を用いて除染試験を行い、表面汚染密度、表面線量率の測定値より算出した低減率の結果を以下に示す。

また、砂利の重量の測定値より算出した研削率の結果を以下に示す。

(5)-1-1) リフレ富岡の砂利の低減率

図 2.29 及び表 2.21 にリフレ富岡の砂利を用いた異なる工法における低減率の結果を示す。



(左：表面汚染密度、右：表面線量率)

図 2.29 リフレ富岡の表面汚染密度及び表面線量率の低減率

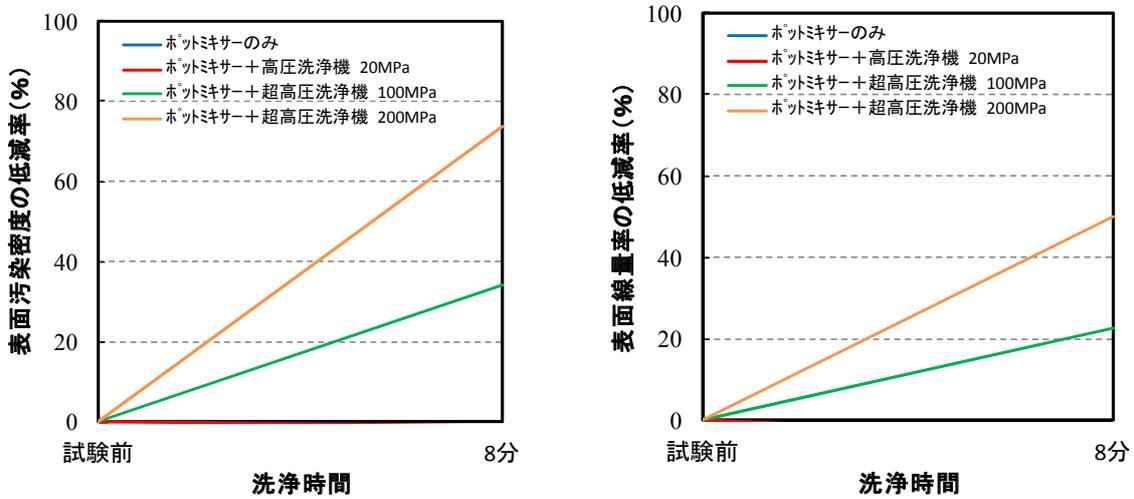
表 2.21 リフレ富岡の表面汚染密度及び表面線量率の低減率

工法条件	表面汚染密度 (cpm)			表面線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )		
	試験前	8分	低減率 (%)	試験前	8分	低減率 (%)
ポットミキサーのみ	3164	2978	6	1.80	1.85	-3
ポットミキサー+ 高圧洗浄機 20MPa	3061	1965	36	2.05	1.31	36
ポットミキサー+ 超高压洗浄機 100MPa	5422	2710	50	3.09	2.17	30
ポットミキサー+ 超高压洗浄機 200MPa	3764	1975	48	1.91	1.34	30

ポットミキサーと高圧水または超高压水洗浄機を組み合わせた工法で、表面汚染密度及び表面線量率は試験した洗淨時間（8分）で有意な低減率が得られることを確認した。これより、これらの工法を用いた場合、リフレ富岡のような形状の砂利に対して除染効果があることが分かった。

(5)-1-2) 夜ノ森駅の砂利の低減率

図 2.30 及び表 2.22 に夜ノ森駅の砂利を用いた異なる工法における低減率の結果を示す。



(左：表面汚染密度、右：表面線量率)

図 2.30 夜ノ森駅の表面汚染密度及び表面線量率の低減率

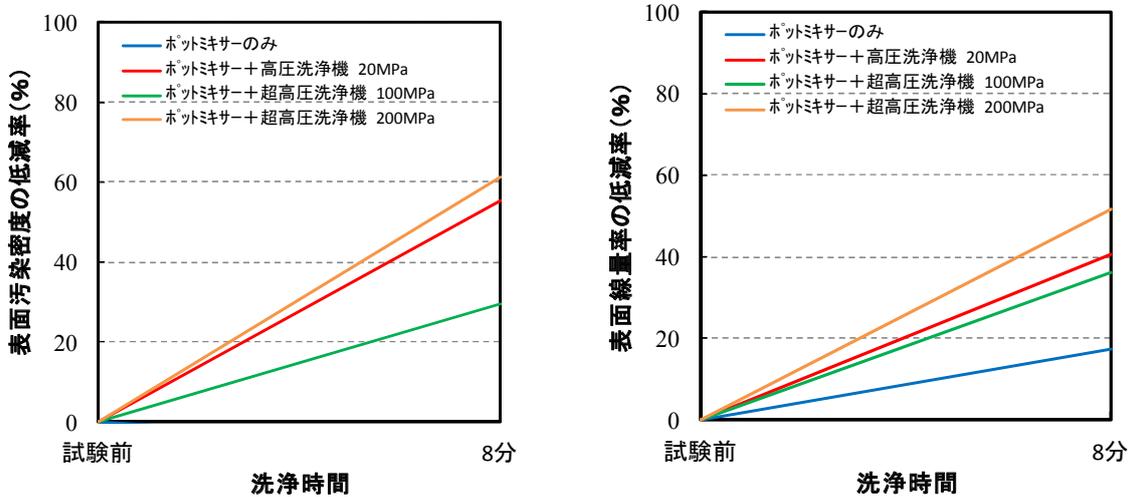
表 2.22 夜ノ森駅の表面汚染密度及び表面線量率の低減率

工法条件	表面汚染密度 (cpm)			表面線量率 ( $\mu$ Sv/h)		
	試験前	8分	低減率 (%)	試験前	8分	低減率 (%)
ホットミキサーのみ	1370	1846	-35	0.56	0.60	-7
ホットミキサー+高圧洗浄機 20MPa	1523	1542	-1	0.45	0.47	-4
ホットミキサー+超高压洗浄機 100MPa	2022	1330	34	0.57	0.44	23
ホットミキサー+超高压洗浄機 200MPa	2564	677	74	0.58	0.29	50

ホットミキサーと高圧水または超高压水洗浄機を組み合わせた工法で、表面汚染密度及び表面線量率は試験した洗浄時間 (8 分) で有意な低減率が得られることを確認した。これより、これらの工法を用いた場合、夜ノ森駅のような形状の砂利に対して除染効果があることが分かった。

(5)-1-3) 富岡町役場バス車庫屋上の砂利の低減率

図 2.31 及び表 2.23 に富岡町役場バス車庫屋上の砂利を用いた異なる工法における低減率の結果を示す。



(左：表面汚染密度、右：表面線量率)

図 2.31 富岡町役場バス車庫屋上の表面汚染密度及び表面線量率の低減率

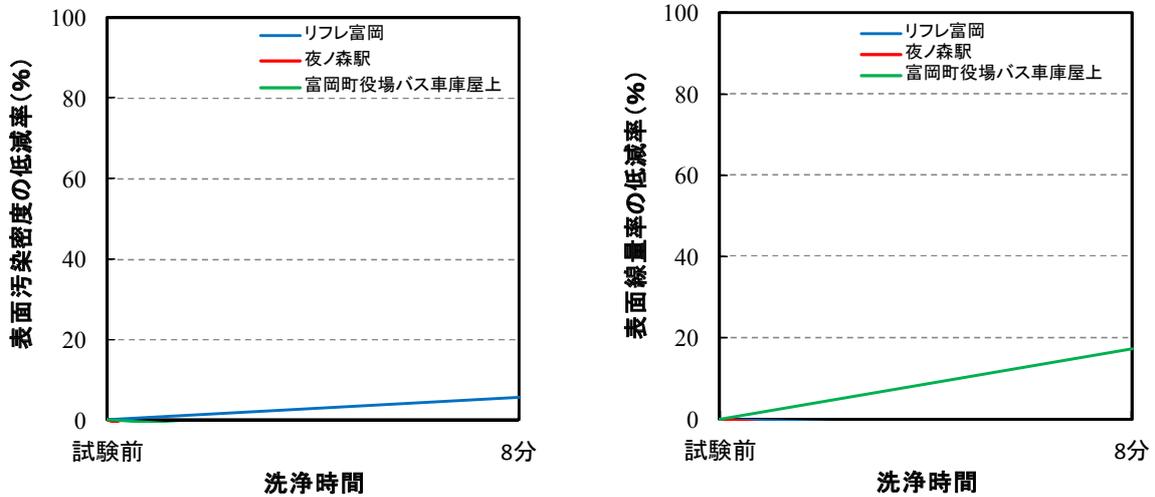
表 2.23 富岡町役場バス車庫屋上の表面汚染密度及び表面線量率の低減率

工法条件	表面汚染密度 (cpm)			表面線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )		
	試験前	8分	低減率 (%)	試験前	8分	低減率 (%)
ホットミキサーのみ	1336	1417	-6	1.04	0.86	17
ホットミキサー+高圧洗浄機 20MPa	1523	678	55	0.99	0.59	40
ホットミキサー+超高压洗浄機 100MPa	1152	812	30	0.94	0.60	36
ホットミキサー+超高压洗浄機 200MPa	1713	665	61	1.22	0.59	52

ホットミキサーと高圧水または超高压水洗浄機を組み合わせた工法で、表面汚染密度及び表面線量率は試験した洗浄時間（8分）で有意な低減率が得られることを確認した。これより、これらの工法を用いた場合、富岡町役場バス車庫屋上のような形状の砂利に対して除染効果があることが分かった。

(5)-2-1) ポットミキサーにおける低減率

図 2.32 及び表 2.24 にポットミキサーを使用した異なる砂利の洗浄における表面汚染密度及び表面線量率の低減率の結果を示す。



(左：表面汚染密度、右：表面線量率)

図 2.32 ポットミキサーにおける表面汚染密度及び表面線量率の低減率

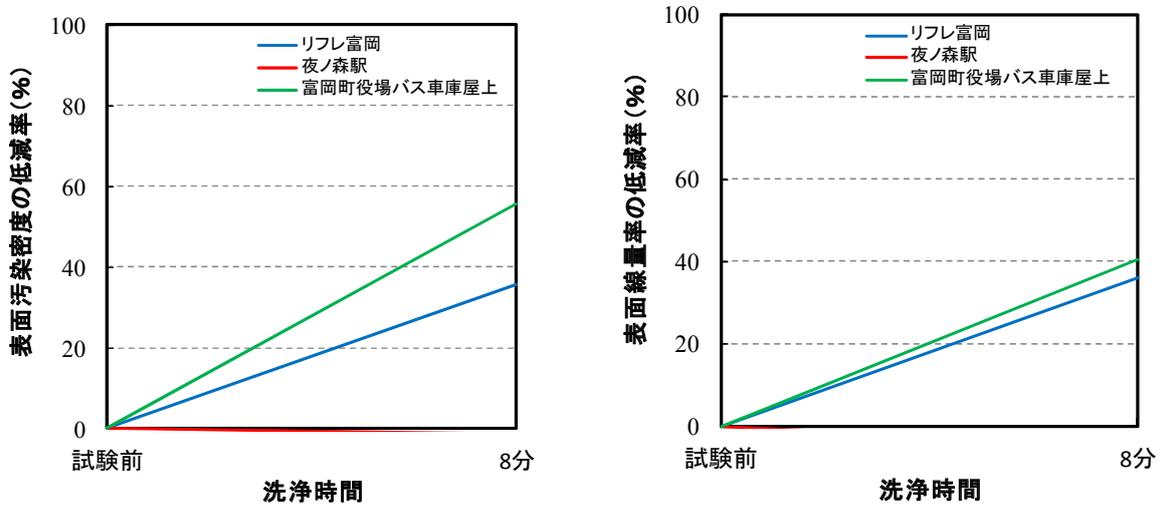
表 2.24 ポットミキサーにおける表面汚染密度及び表面線量率の低減率

砂利の種類	表面汚染密度 (cpm)			表面線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )		
	試験前	8分	低減率 (%)	試験前	8分	低減率 (%)
リフレ富岡宿泊棟 雨だれ部	3164	2978	6	1.80	1.85	-3
夜ノ森駅	1370	1846	-35	0.56	0.60	-7
富岡町役場 バス車庫屋上	1336	1417	-6	1.04	0.86	17

ポットミキサーのみの工法では、全ての試験において有効な低減率が得られず、ポットミキサーの回転数程度 (28rpm) では、砂利の共摺りによる除染効果は無いことが分かった。

(5)-2-2) ポットミキサー+高圧水洗浄機 (20MPa) における低減率

図 2.33 及び表 2.25 にポットミキサーと高圧水洗浄機を組み合わせた工法を使用した異なる砂利の洗浄における表面汚染密度及び表面線量率の低減率の結果を示す。



(左: 表面汚染密度、右: 表面線量率)

図 2.33 ポットミキサー+高圧水洗浄機 (20MPa) における表面汚染密度及び表面線量率の低減率

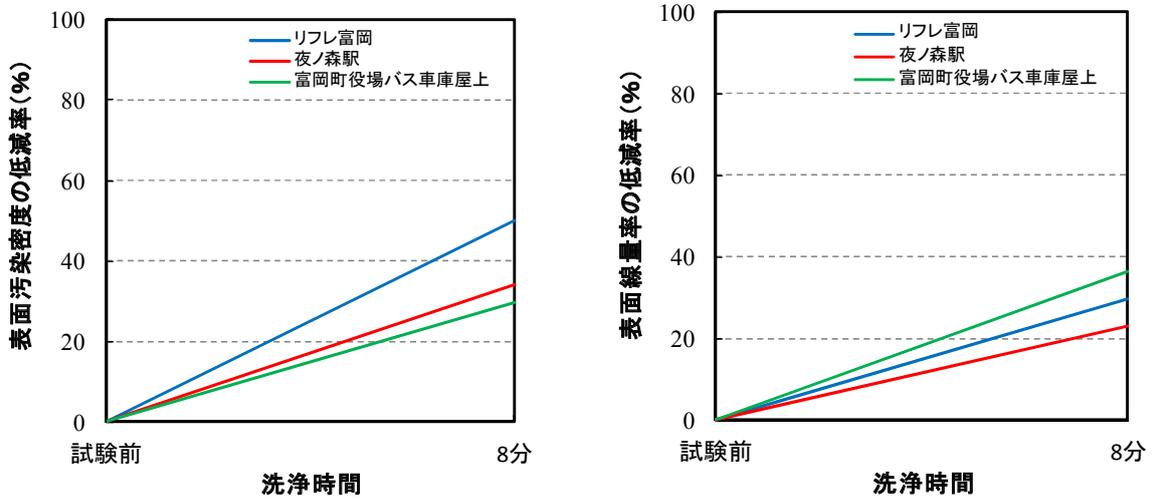
表 2.25 ポットミキサー+高圧水洗浄機 (20MPa) における表面汚染密度及び表面線量率の低減率

砂利の種類	表面汚染密度 (cpm)			表面線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )		
	試験前	8分	低減率 (%)	試験前	8分	低減率 (%)
リフレ富岡宿泊棟 雨だれ部	3061	1965	36	2.05	1.31	36
夜ノ森駅	1523	1542	-1	0.45	0.47	-4
富岡町役場 バス車庫屋上	1523	678	55	0.99	0.59	40

ポットミキサーと高圧水洗浄機 (20MPa) を組み合わせた工法では、夜ノ森駅の砂利の低減効果が得られなかったが、他の砂利では有意な低減率が得られることを確認した。

(5)-2-3) ポットミキサー+超高压水洗浄機 (100MPa) における低減率

図 2.34 及び表 2.26 にポットミキサーと超高压水洗浄機 (100MPa) を組み合わせた工法を使用した異なる砂利の洗浄における表面汚染密度及び表面線量率の低減率の結果を示す。



(左: 表面汚染密度、右: 表面線量率)

図 2.34 ポットミキサー+高压水洗浄機 (100MPa) における表面汚染密度及び表面線量率の低減率

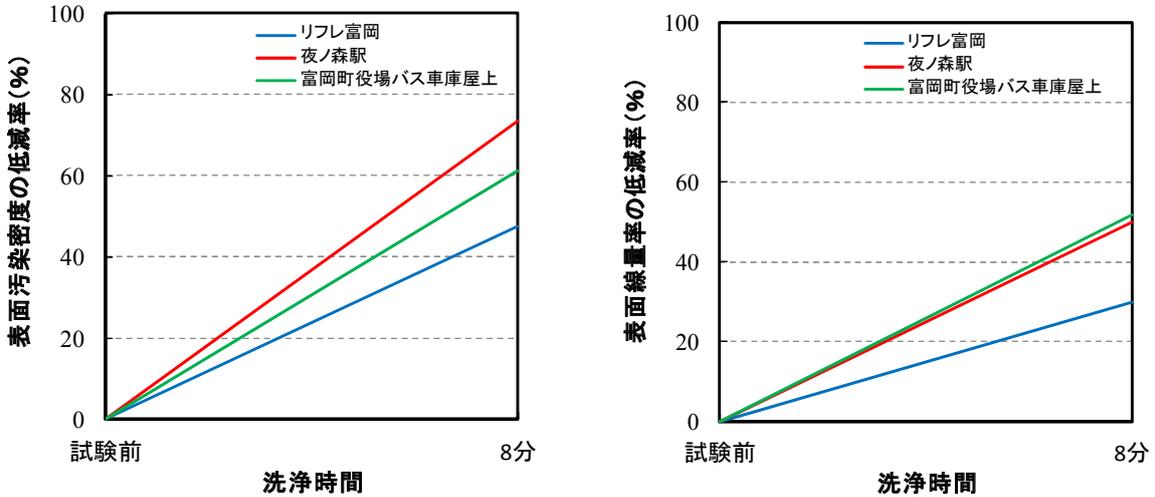
表 2.26 ポットミキサー+高压水洗浄機 (100MPa) における表面汚染密度及び表面線量率の低減率

砂利の種類	表面汚染密度 (cpm)			表面線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )		
	試験前	8分	低減率 (%)	試験前	8分	低減率 (%)
リフレ富岡宿泊棟 雨だれ部	5422	2710	50	3.09	2.17	30
夜ノ森駅	2022	1330	34	0.57	0.44	23
富岡町役場 バス車庫屋上	1152	812	30	0.94	0.60	36

ポットミキサーと超高压水洗浄機 (100MPa) を組み合わせた工法では、試験に使用したどの砂利においても放射線量の低減効果を確認した。これよりこの工法は砂利の除染に有効的であることが分かった。

(5)-2-4) ポットミキサー+超高压水洗浄機 (200MPa) における低減率

図 2.35 及び表 2.27 にポットミキサーと超高压水洗浄機 (200MPa) を組み合わせた工法を使用した異なる砂利の洗浄における表面汚染密度及び表面線量率の低減率の結果を示す。



(左: 表面汚染密度、右: 表面線量率)

図 2.35 ポットミキサー+高压水洗浄機 (200MPa) における表面汚染密度及び表面線量率の低減率

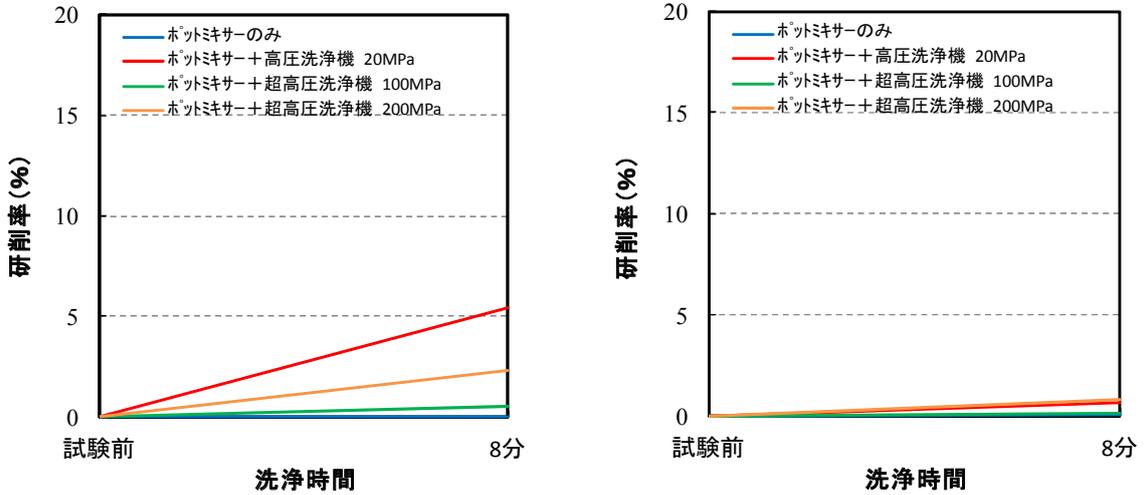
表 2.27 ポットミキサー+高压水洗浄機 (200MPa) における表面汚染密度及び表面線量率の低減率

砂利の種類	表面汚染密度 (cpm)			表面線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )		
	試験前	8分	低減率 (%)	試験前	8分	低減率 (%)
リフレ富岡宿泊棟 雨だれ部	3764	1975	48	1.91	1.34	30
夜ノ森駅	2564	677	74	0.58	0.29	50
富岡町役場 バス車庫屋上	1713	665	61	1.22	0.59	52

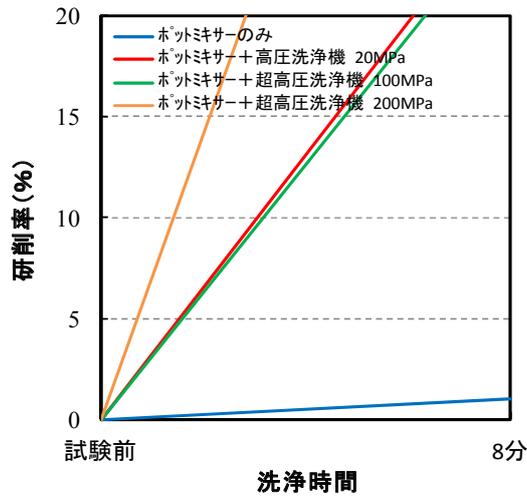
ポットミキサーと超高压水洗浄機 (200MPa) を組み合わせた工法では、試験に使用したどの砂利においても放射線量の低減効果を確認した。これよりこの工法は砂利の除染に有効的であることが分かった。

(5)-3-1) 砂利の研削率

図 2.36 及び表 2.28 に異なる洗浄工法を用いた各砂利の研削率の結果を示す。



(左: リフレ富岡、右: 夜ノ森駅)



(富岡町役場バス車庫屋上)

図 2.36 リフレ富岡・夜ノ森駅・富岡町役場バス車庫屋上の砂利の研削率

表 2.28 リフレ富岡・夜ノ森駅・富岡町役場バス車庫屋上の砂利の研削率

工法条件	砂利の重量 (kg)								
	リフレ富岡			夜ノ森駅			富岡町役場 バス車庫屋上		
	試験前	8分	研削率 (%)	試験前	8分	研削率 (%)	試験前	8分	研削率 (%)
ポットミキサーのみ	20.00	20.00	0.00	20.00	19.98	0.10	20.00	19.80	1.00
ポットミキサー＋ 高圧洗浄機 20MPa	20.00	18.91	5.45	20.00	19.86	0.70	20.00	14.74	26.30
ポットミキサー＋ 超高压洗浄機 100MPa	20.00	19.89	0.55	20.00	19.97	0.15	20.00	14.94	25.30
ポットミキサー＋ 超高压洗浄機 200MPa	20.00	19.54	2.30	20.00	19.84	0.80	20.00	8.68	56.60

異なる洗浄工法を用いた各砂利の研削率は、富岡町役場バス車庫屋上の砂利が試験した他の砂利に比べて高い結果になった。

特にポットミキサーと高圧及び超高压水洗浄機を組み合わせた 3 種類の工法が 20%以上の研削率を示し、顕著な結果となった。

これは、富岡町役場バス車庫屋上の石の大きさが数mmから 2 cm程度であり、洗浄時に高圧または超高压水洗浄機の洗浄水によって石表面の放射性物質を取り除くことと同時に石自身も洗浄水の力によって吹き飛ばされ、ポットミキサー内部面や石同士がぶつかり合い、研磨、破砕された（写真 2.16）ことが原因であると考えられる。その結果、洗浄後に行う砂利の排出や砂利の濯ぎにおいて、小さくなった砂利の破片はテストピース板から抜け、重量が減少したものと考えられる。



写真 2.16 富岡町役場バス車庫屋上の洗浄後の状態（ポットミキサー＋高圧水洗浄機）

リフレ富岡の砂利については、研削率が 10%以下であるが、表面汚染密度及び表面線量率の低減率をみると、ポットミキサーと高圧及び超高压水洗浄機を組み合わせたものは 30～50%の低減率が得られている。

夜ノ森駅の砂利については、研削率が 1%以下と他の石に比べて非常に低い。しかしポットミ

キサーと超高压水洗浄機（200MPa）を組み合わせた工法では、表面汚染密度及び表面線量率の低減率が50%以上あることから、放射性物質は石の表面に付着しているものが多く、攪拌と高い圧力で洗浄を行えば高い除染効果が得られると推察される。

工法の違いで比較した場合、ポットミキサーと高压水洗浄機を組み合わせたものは、ポットミキサーと超高压水洗浄機（100MPa）を組み合わせたものより研削率が高くなる傾向となった。この理由として洗浄機から噴射された水の量による力が超高压水洗浄機（100MPa）に比べて高压水洗浄機の方が大きく、石の表面が研削されやすいのではないかと考えられる。

## (6) 考察

本項では、立体的な洗浄方法を用いて実際に放射性物質が付着した砂利を使用して除染効果が得られるかを確認し検証を行った。

試験結果としては、ポットミキサーと高压及び超高压水洗浄機を組み合わせた立体的な除染方法が有効的であることが確認できた。

しかし、試験したものによっては試験前後での放射線量数値が逆転している部分も発生した。

これは、除染効果よりも、「元々の砂利の上下面の汚染レベルのバラツキ」や「表面汚染密度及び表面線量率という局所的な放射線量測定方法」の影響が大きいためと考える。

現行の測定方法（テストピース板上での表面汚染密度及び表面線量率）は、試験前に汚染の低い砂利を測り、試験後に汚染の高い砂利を測るなど、測定するポイントの直近の砂利の放射線量に影響を受けることが原因であると考えられる。

このことより、安定した除染効果をみるための測定方法の改善、また、この立体的な洗浄方法において、より適切な除染時間を検証する必要がある。

### 2.4.3.3 高圧水・超高压水の除染時間別洗浄

前項の試験において、ポットミキサーと高圧及び超高压水洗浄機を組み合わせた洗浄方法が砂利の除染に有効的であることを確認した。

しかし、洗浄時間を8分に固定した試験のため、砂利の洗浄を行う効果的な時間がどれくらい必要なのかまだ不明な点が多い。

そこで本項では、上記の工法を用いて洗浄時間をパラメータとして、除染効果の高い効率的な洗浄時間を検証することとした。

また、安定した除染効果を確認するため、前項まで問題となっていた放射線量の測定方法について、以下のとおり変更した。

- 1) 測定にあたりバックグラウンドも下げる工夫し、プラスチックケースの内側に、100×200×50 mmの鉛ブロックを下面に敷き詰め、4辺の壁ができるように鉛ブロックを積み上げた遮へいボックス(内寸400×400 mm、内部深さ550 mm、鉛厚さ50 mm)を作製した(写真2.17参照)。
- 2) 測定のパラツキを少なくするため、バケツに入れた砂利を遮へいボックス内に入れ、砂利の充填面からの高さ10、20、30cmの3点で表面汚染密度と空間線量率を測定した。



写真 2.17 遮へいボックス

また、本項の試験前に、より除染能力を高めるために高圧水洗浄機の先端ノズルを扇形タイプからサイクロンタイプに変更(表2.29)した。本項以降の試験では、サイクロンタイプで高圧水洗浄機の試験を行った。

表 2.29 高圧水洗浄機のノズルの変更

変更前	変更後
扇形タイプ	サイクロンタイプ
	

(1) 砂利の種類

砂利は、2.1 節の図 2.1 に示した砂利の内、リフレ富岡宿泊棟雨だれ部、夜ノ森駅及び太田陸前浜街道踏切を使用した。なお、富岡町役場バス車庫屋上の砂利は水圧で砕けてしまうことから本試験の対象外とした。

(2) 使用機械

使用機械は 2.2 節の図 2.3 に示した内の高圧水洗浄機、超高压水洗浄機の 2 種類及びポットミキサーを使用した。

(3) 試験方法

ポットミキサーと高圧及び超高压水洗浄機を組み合わせ、ミキサー内の砂利を攪拌しながら時間を変えて洗浄した。

試験パターンを表 2.30 に、試験フローを図 2.37 に示す。

表 2.30 除染時間における効果の確認試験パターン

試験 No.	使用機械	砂利の種類	試験時間 (分)
KR-1④	ポットミキサー + 高圧水洗浄機	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	4
KR-1③			8
KR-1⑤			16
KY-1①		夜ノ森駅	4
KY-1③			8
KY-1④			16
KF-1②		太田陸前浜街道踏切	4
KF-1①			8
KF-1③			16
CR-2②	ポットミキサー + 超高压水洗浄機 (200MPa)	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	4
CR-2①			8
CR-2③			16
CY-2②		夜ノ森駅	4
CY-2①			8
CY-2③			16
CF-2②		太田陸前浜街道踏切	4
CF-2①			8
CF-2③			16

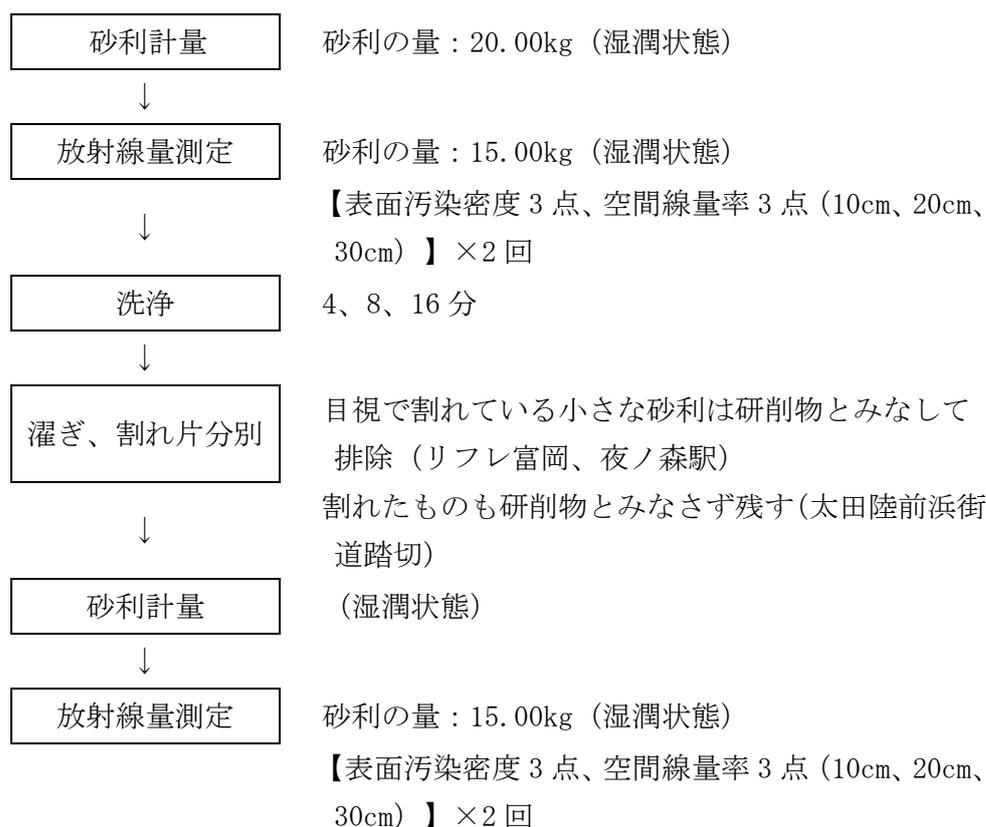


図 2.37 除染時間における効果の確認試験フロー

砂利を水で濡らしてから、試験前測定として砂利の重量及び放射線量測定用の重量（15kg）と放射線量を測定した。測定終了後、全体量が 20kg の砂利をポットミキサーに充填した。さらにポットミキサーからこぼれない程度の水を充填した。高圧又は超高压水洗浄機のハンドガンセットし、砂利にハンドガンのノズルから噴出した水が十分に当たるように調整をした。

調整完了後、ポットミキサーを運転しながら洗浄を行った。試験時間は 4 分、8 分、16 分の 3 つに設定した。

洗浄終了後、ポットミキサーから砂利を取り出してきれいな水で濯ぎ、軽く水を切った状態で砂利全体の重量及び放射線量測定用の重量（15kg）と放射線量を測定した。

測定のバラつきを少なくするため、試験前測定は、プラスチックバケツの中にデジタル台秤で計量した砂利 20kg の内、研削物として減量する分を見込み、15kg を充填し、砂利上面を出来るだけ平坦に均した後、表面汚染密度（砂利上面からの距離 1 cm）を 3 ポイント測定した。また表面線量率は、砂利の汚染密度の影響を受けやすいので、ここでは平均的な線量率を測定するため、空間線量率を砂利上面から高さ 10 cm、20 cm、30 cm の 3 点測定した。

さらに、測定値の平均化を図るため、別のバケツに移し替えることで砂利の測定面を反転した上で、同様に表面汚染密度、空間線量率の測定を行った。

検証に使用する放射線量の数値は、上記測定したポイント数の平均値（表面汚染密度は合計 6 ポイント、空間線量率は 10、20、30 cm とも合計各 2 ポイント）として算出した（写真 2.18）。



写真 2.18 放射線量の測定方法

#### (4) 試験状況

試験状況を写真 2.19 に示す。



砂利重量測定 (試験前)



線量測定用重量 15kg 測定 (試験前)

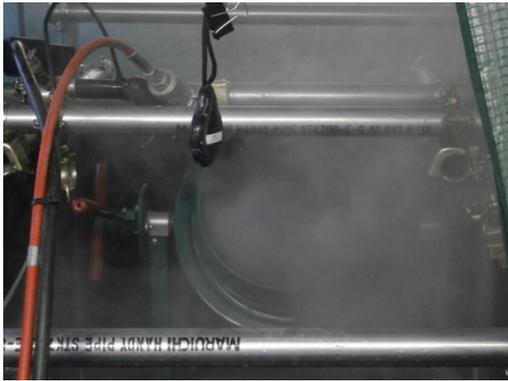


砂利投入



試験状況 (高圧水洗浄機)

写真 2.19 除染時間別の試験状況 (1/2)



試験状況（超高压水洗净機）



砂利排出



砂利排出後



濯ぎ



水切り



割れ片選別



砂利重量測定（試験後）



線量測定用重量 15kg 測定（試験後）

写真 2.19 除染時間別の試験状況（2/2）

(5) 試験結果

(5)-1) リフレ富岡の砂利の低減率

a) 表面汚染密度

図 2.38 に、リフレ富岡で採取した砂利を使用した洗浄時間の違いにおける表面汚染密度の低減率の変化、表 2.31 に各洗浄時間における除染前後の表面汚染密度と算出した低減率を示す。

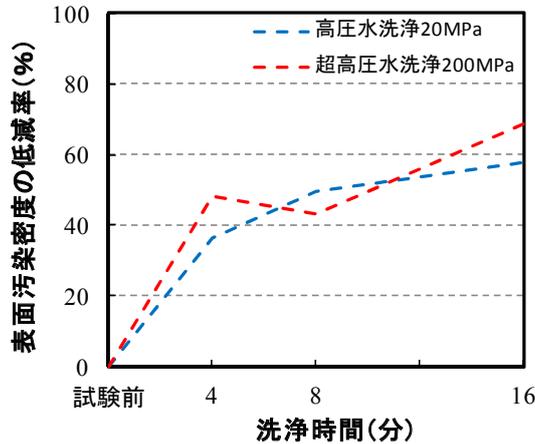


図 2.38 洗浄時間における表面汚染密度の低減率の変化（リフレ富岡）

表 2.31 洗浄時間における表面汚染密度の低減率の変化（リフレ富岡）

	洗浄時間 (分)	高圧水洗浄 20MPa			超高圧水洗浄 200MPa		
		洗浄前	洗浄後	低減率 (%)	洗浄前	洗浄後	低減率 (%)
表面汚染密度 [cpm]	4	7197	4570	37	6734	3487	48
	8	6715	3401	49	4277	2422	43
	16	8325	3509	58	6900	2172	69

リフレ富岡で採取した砂利の表面汚染密度の低減率は、高圧水洗浄機及び超高圧水洗浄機共に洗浄開始から 4 分後で約 40～50%と大幅な増加をしており、その後 16 分後で約 60～70%と緩やかな増加傾向を示した。

工法の違いで比較した場合、低減率は高圧水洗浄機、超高圧水洗浄機とも類似した傾向を示し、大きな違いは得られなかった。

b) 空間線量率

図 2.39 にリフレ富岡の砂利を使用した洗浄時間の違いにおける空間線量率の低減率の変化、表 2.32 に各洗浄時間における除染前後の空間線量率と算出した低減率を示す。

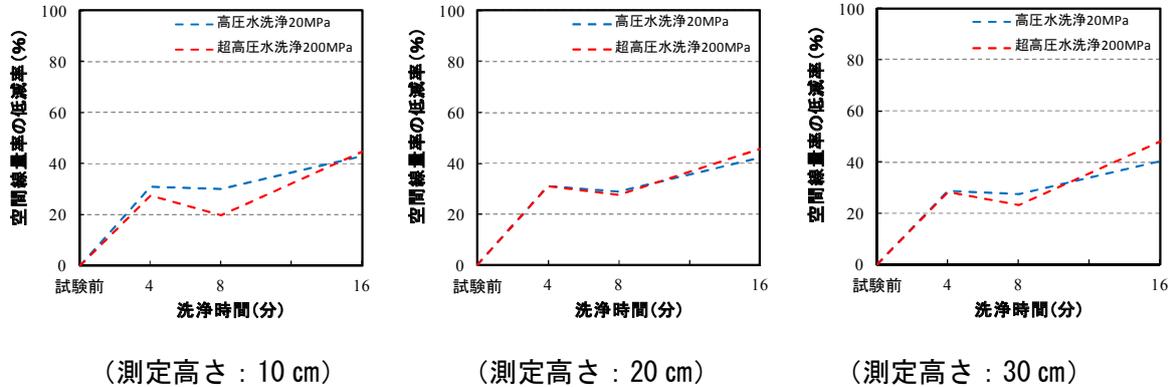


図 2.39 洗浄時間における空間線量率の低減率の変化 (リフレ富岡)

表 2.32 洗浄時間における空間線量率の低減率の変化 (リフレ富岡)

	測定高さ	洗浄時間 (分)	高圧水洗浄 20MPa			超高圧水洗浄 200MPa		
			洗浄前	洗浄後	低減率 (%)	洗浄前	洗浄後	低減率 (%)
空間線量率 [ $\mu$ Sv/h]	10cm	4	3.24	2.24	31	3.07	2.23	27
		8	2.43	1.70	30	1.83	1.47	20
		16	3.53	2.01	43	2.89	1.60	45
	20cm	4	1.55	1.07	31	1.45	1.00	31
		8	1.22	0.87	29	0.90	0.65	28
		16	1.69	0.98	42	1.36	0.74	46
	30cm	4	0.90	0.64	29	0.85	0.61	28
		8	0.73	0.53	27	0.52	0.40	23
		16	0.97	0.58	40	0.81	0.42	48

リフレ富岡で採取した砂利の空間線量率の低減率は、高圧水洗浄機及び超高圧水洗浄機共に洗浄開始から 4 分後で約 30%と大幅な増加をしており、その後 16 分後で約 40~50%と緩やかな増加傾向を示した。

工法の違いで比較した場合、低減率は高圧水洗浄機、超高圧水洗浄機とも類似した傾向を示し、大きな違いは得られなかった。

(5)-2) 夜ノ森駅の砂利の低減率

a) 表面汚染密度

図 2.40 に夜ノ森駅で採取した砂利を使用した洗浄時間の違いにおける表面汚染密度の低減率の変化、表 2.33 に各洗浄時間における除染前後の表面汚染密度と算出した低減率を示す。

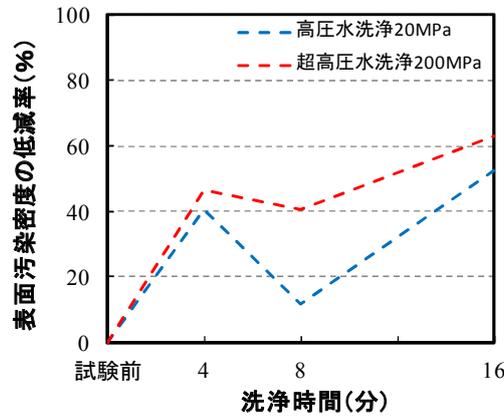


図 2.40 洗浄時間における表面汚染密度の低減率の変化 (夜ノ森駅)

表 2.33 洗浄時間における表面汚染密度の低減率の変化 (夜ノ森駅)

	洗浄時間 (分)	高圧水洗浄 20MPa			超高压水洗浄 200MPa		
		洗浄前	洗浄後	低減率 (%)	洗浄前	洗浄後	低減率 (%)
表面汚染密度 [cpm]	4	4226	2513	41	3313	1778	46
	8	2779	2453	12	2850	1696	40
	16	3734	1782	52	3286	1215	63

夜ノ森駅で採取した砂利の表面汚染密度の低減率は、高圧水洗浄機及び超高压水洗浄機共に洗浄開始から 4 分後で約 40~50%と大幅な増加をしており、その後 16 分後で約 50~65%と緩やかな増加傾向を示した。

工法の違いで比較した場合、低減率は高圧水洗浄機、超高压水洗浄機とも類似した傾向を示し、大きな違いは得られなかった。

b) 空間線量率

図 2.41 に夜ノ森駅の砂利を使用した洗浄時間の違いにおける空間線量率の低減率の変化、表 2.34 に各洗浄時間における除染前後の空間線量率と算出した低減率を示す。

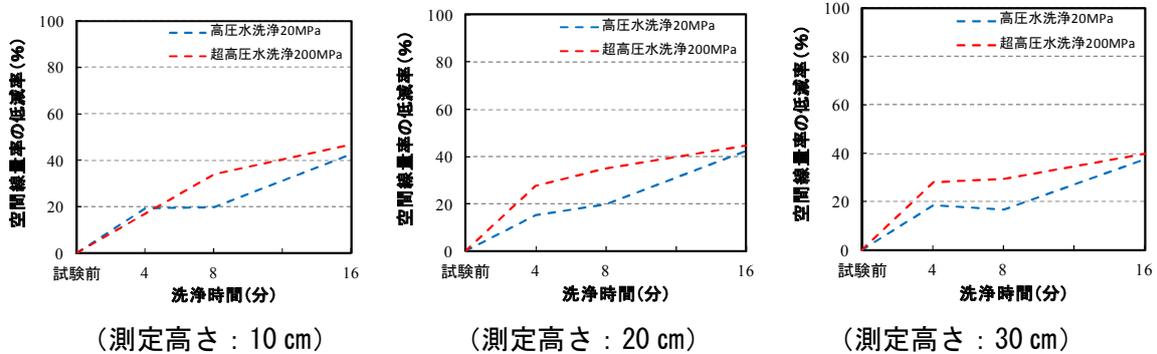


図 2.41 洗浄時間における空間線量率の低減率の変化

表 2.34 洗浄時間における空間線量率の低減率の変化 (夜ノ森駅)

	測定高さ	洗浄時間(分)	高圧水洗浄 20MPa			超高圧水洗浄 200MPa		
			洗浄前	洗浄後	低減率 (%)	洗浄前	洗浄後	低減率 (%)
空間線量率 [ $\mu$ Sv/h]	10 cm	4	0.82	0.66	20	0.77	0.64	17
		8	0.70	0.56	20	0.74	0.49	34
		16	0.77	0.44	43	0.79	0.42	47
	20 cm	4	0.39	0.33	15	0.40	0.29	28
		8	0.35	0.28	20	0.37	0.24	35
		16	0.40	0.23	43	0.38	0.21	45
	30 cm	4	0.27	0.22	19	0.25	0.18	28
		8	0.24	0.20	17	0.24	0.17	29
		16	0.24	0.15	38	0.25	0.15	40

夜ノ森駅で採取した砂利の空間線量率の低減率は、洗浄開始から 4 分後に高圧水洗浄機で約 20%、超高圧水洗浄機で約 20~30%に増加しており、その後、両洗浄機とも 16 分後で約 40~50%と若干緩やかな増加傾向を示した。

工法の違いで比較した場合、低減率は高圧水洗浄機、超高圧水洗浄機とも類似した傾向を示し、大きな違いは得られなかった。

(5)-3) 太田陸前浜街道踏切の砂利の低減率

a) 表面汚染密度

図 2.42 に太田陸前浜街道踏切で採取した砂利を使用した洗浄時間の違いにおける表面汚染密度の低減率の変化、表 2.35 に各洗浄時間における除染前後の表面汚染密度と算出した低減率を示す。

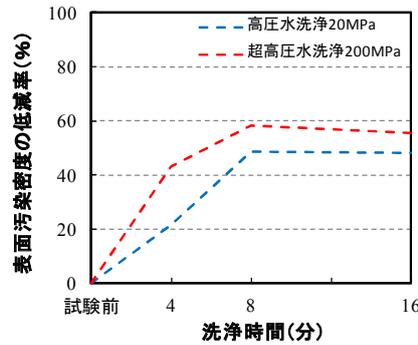


図 2.42 洗浄時間における表面汚染密度の低減率の変化 (太田陸前浜街道踏切)

表 2.35 洗浄時間における表面汚染密度の低減率の変化 (太田陸前浜街道踏切)

	洗浄時間 (分)	高圧水洗浄 20MPa			超高圧水洗浄 200MPa		
		洗浄前	洗浄後	低減率 (%)	洗浄前	洗浄後	低減率 (%)
表面汚染密度 [cpm]	4	766	602	21	829	472	43
	8	848	436	49	995	414	58
	16	712	370	48	860	381	56

太田陸前浜街道踏切で採取した砂利の表面汚染密度の低減率は、洗浄開始から 4 分後に高圧水洗浄機で約 20%、超高圧水洗浄機で約 40%に増加しており、その後、8 分後に高圧水洗浄機で約 50%、超高圧水洗浄機で約 60%に増加した。さらに後の 16 分後には両洗浄機共に 8 分後と殆ど変わらない傾向を示した。

これは、太田陸前浜街道踏切の砂利の元々の汚染レベルが低く、砂利表面に付着していた放射性物質が除染されたと推察する。

工法の違いで比較した場合、低減率は高圧水洗浄機、超高圧水洗浄機とも類似した傾向を示し、大きな違いは得られなかった。

b) 空間線量率

図 2.43 に太田陸前浜街道踏切の砂利を使用した洗浄時間の違いにおける空間線量率の低減率の変化、表 2.36 に各洗浄時間における除染前後の空間線量率と算出した低減率を示す。

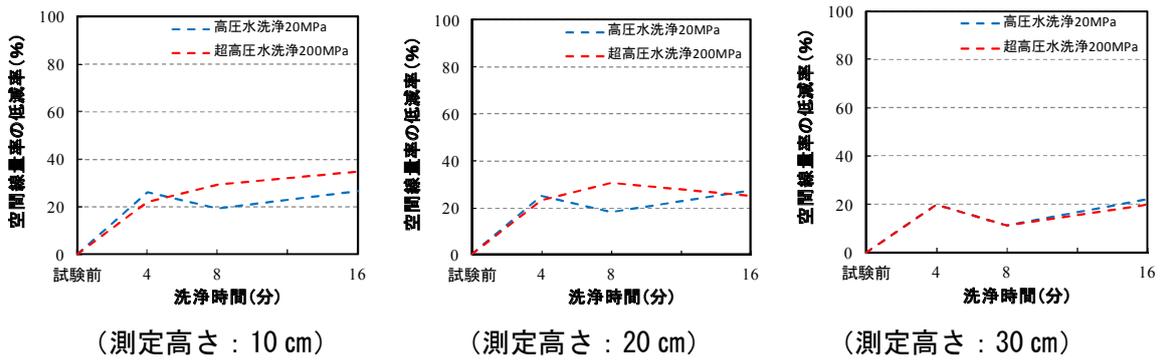


図 2.43 洗浄時間における空間線量率の低減率の変化

表 2.36 洗浄時間における空間線量率の低減率の変化（太田陸前浜街道踏切）

	測定高さ	洗浄時間(分)	高圧水洗浄 20MPa			超高圧水洗浄 200MPa		
			洗浄前	洗浄後	低減率 (%)	洗浄前	洗浄後	低減率 (%)
空間線量率 [ $\mu$ Sv/h]	10 cm	4	0.23	0.17	26	0.23	0.18	22
		8	0.21	0.17	19	0.24	0.17	29
		16	0.19	0.14	26	0.23	0.15	35
	20 cm	4	0.12	0.09	25	0.13	0.10	23
		8	0.11	0.09	18	0.13	0.09	31
		16	0.11	0.08	27	0.12	0.09	25
	30 cm	4	0.10	0.08	20	0.10	0.08	20
		8	0.09	0.08	11	0.09	0.08	11
		16	0.09	0.07	22	0.10	0.08	20

太田陸前浜街道踏切で採取した砂利の空間線量率の低減率は、高圧水洗浄機及び超高圧水洗浄機共に洗浄開始から4分後で約20%に増加をしており、その後8分後及び16分後には両洗浄機共に4分後と殆ど変わらない傾向を示した。

これは、太田陸前浜街道踏切の砂利の元々の汚染レベルが低く、砂利表面に付着していた放射性物質が除染されたと推察する。

工法の違いで比較した場合、低減率は高圧水洗浄機、超高圧水洗浄機とも類似した傾向を示し、大きな違いは得られなかった。

(5)-4) 各種砂利の研削率

本項で試験した各種砂利の洗浄時間における研削率の結果を図 2.44 及び表 2.37 に示す。

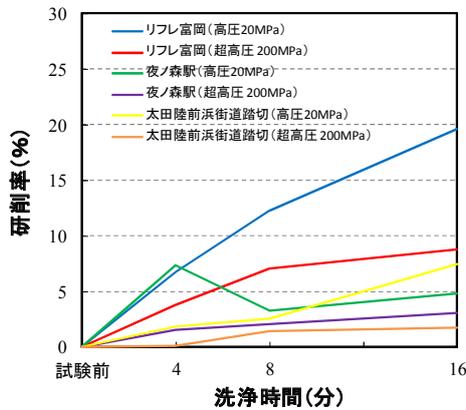


図 2.44 各種砂利の洗浄時間における研削率

表 2.37 各種砂利の洗浄時間における砂利の重量と研削率の変化

砂利の種類	使用機械	洗浄時間 (分)	重量 (kg)		研削率 (%)
			試験前	試験後	
リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	高圧水洗浄 20MPa	4	20.00	18.65	6.75
		8	20.00	17.55	12.25
		16	20.00	16.08	19.60
	超高圧水洗浄 200MPa	4	20.00	19.25	3.75
		8	20.00	18.58	7.10
		16	20.00	18.24	8.80
夜ノ森駅	高圧水洗浄 20MPa	4	20.00	18.53	7.35
		8	20.00	19.34	3.30
		16	20.00	19.03	4.85
	超高圧水洗浄 200MPa	4	20.00	19.70	1.50
		8	20.00	19.58	2.10
		16	20.00	19.38	3.10
太田陸前浜 街道踏切	高圧水洗浄 20MPa	4	20.00	19.63	1.85
		8	20.00	19.48	2.60
		16	20.00	18.50	7.50
	超高圧水洗浄 200MPa	4	20.00	19.97	0.15
		8	20.00	19.71	1.45
		16	20.00	19.65	1.75

各種砂利において、洗浄時間の増加とともに研削率が増加した。

砂利の種類で比較した場合、リフレ富岡の研削率が夜ノ森駅や太田陸前浜街道踏切に比べて高い。これは石の材質（硬さ）が他の砂利に比べて割れやすい性質のため研削されやすいことが考えられる。

工法の違いで比較した場合、高圧水洗浄機は超高圧水洗浄機に比べ研削率が高くなった。これは、どの砂利の種類にも同じ傾向を示した。

(6) 考察

本項では、立体的除染に有効的な工法であるポットミキサーと高圧又は超高压水洗浄機を組み合わせた方法において、洗浄時間の変化に伴う除染効果の確認を行った。

砂利の種類に関係なく、洗浄開始から4分間で放射線量の数値が大きく低減しており、そこから洗浄時間を長くしても緩やかな減少傾向を示す形になった。これは、開始から4分間の洗浄で表面に付着した放射性物質が吸着した土やほこりが除去されたこと、また砂利の表面に付着した放射性物質が、洗浄・研磨により除去されたことが原因であると考えられる。

その後の洗浄時間で放射線量の低下が少ないのは、砂利表面の洗浄から砂利内部に浸透した放射性物質を除去するために、砂利の研削が必要であるためと推察される。

研削率の変化においては、洗浄時間が長いほど研削率も高くなる。

また、石の材質や硬さ、形状の違いで研削率の違いが現れており、試験した石では衝撃に脆く割れやすい性質であるリフレ富岡の砂利が、他の砂利と比較して高い研削率となった。

工法の違いで比較した場合、超高压水洗浄機（200MPa）に比べて高圧水洗浄機（20MPa）の方が高い研削率となった。これは砂利の種類に関係なく同様であり、洗浄終了後の砂利に「割れ」が多く発生（表 2.38、写真 2.20 参照）していることから、砂利の形状・材質等の影響ではなく、水圧で表面を削ることより水量で砂利を押しつける力が大きく、その結果、砂利同士がぶつかった衝撃で割れてしまうことが考えられる。

表 2.38 砂利の割れ片重量

試験 No.	使用機械	砂利の種類	洗浄時間 (分)	砂利の割れ片重量 [kg]
KR-1④	ポットミキサー + 高圧水洗浄機	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	4	0.63
KR-1③			8	1.26
KR-1⑤			16	0.90
KY-1①		夜ノ森駅	4	0.25
KY-1③			8	0.45
KY-1④			16	0.51
CR-2②	ポットミキサー + 超高压水洗浄機 (200MPa)	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	4	0.12
CR-2①			8	0.12
CR-2③			16	0.28
CY-2②		夜ノ森駅	4	0.07
CY-2①			8	0.08
CY-2③			16	0.16



高圧水洗浄機（4分試験後）



超高圧水洗浄機（4分試験後）

写真 2.20 砂利の割れ状況（リフレ富岡）

本項の試験から、除染時間の变化による除染効果が確認できた。しかし、断片的な時間設定であることや、使用した砂利が試験ごとに異なるため、一連の作業としては確認しにくい部分もあることが分かった。

同じ砂利を使用し、連続して除染時間を变化させた場合の除染効果の検証を行う必要がある。

### 2.4.3.4 同一砂利での除染時間変化の検証

前項にて実施した洗浄時間を変化させた砂利の除染試験においては、除染前の放射線量や石の形状等にバラツキがあり、実際の除染時間の変化に伴う効果や比較が難しい場合があった。そこで本項では、同一砂利を用い除染時間変化における除染効果の確認を検証することとした。

#### (1) 砂利の種類

砂利は、2.1 節の図 2.1 に示した砂利のうち、リフレ富岡宿泊棟雨だれ部、夜ノ森駅及び太田陸前浜街道踏切を使用した。

#### (2) 使用機械

使用機械は 2.2 節の図 2.3 に示した内の高圧水洗浄機、超高压水洗浄機の 2 種類及びポットミキサーを使用した。

#### (3) 試験方法

ポットミキサーと高圧及び超高压水洗浄機を組み合わせ、ミキサー内の砂利を攪拌しながら洗浄し、洗浄時間毎に砂利を測定した。

試験パターンを表 2.39 に、試験フローを図 2.45 に示す。

表 2.39 同一砂利での除染時間変化試験パターン

試験 No.	使用機械	砂利の種類	試験時間(分)
PR-1	ポットミキサー	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	4、8、16 (逐次運転)
PY-1		夜ノ森駅	
PF-1		太田陸前浜街道踏切	
KR-1-1	ポットミキサー + 高圧水洗浄機	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	
KY-1-1		夜ノ森駅	
KF-1-1		太田陸前浜街道踏切	
CR-1-1	ポットミキサー + 超高压水洗浄機 (100MPa)	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	
CY-1-1		夜ノ森駅	
CF-1-1		太田陸前浜街道踏切	
CR-2-1	ポットミキサー + 超高压水洗浄機 (200MPa)	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	
CY-2-1		夜ノ森駅	
CF-2-1		太田陸前浜街道踏切	

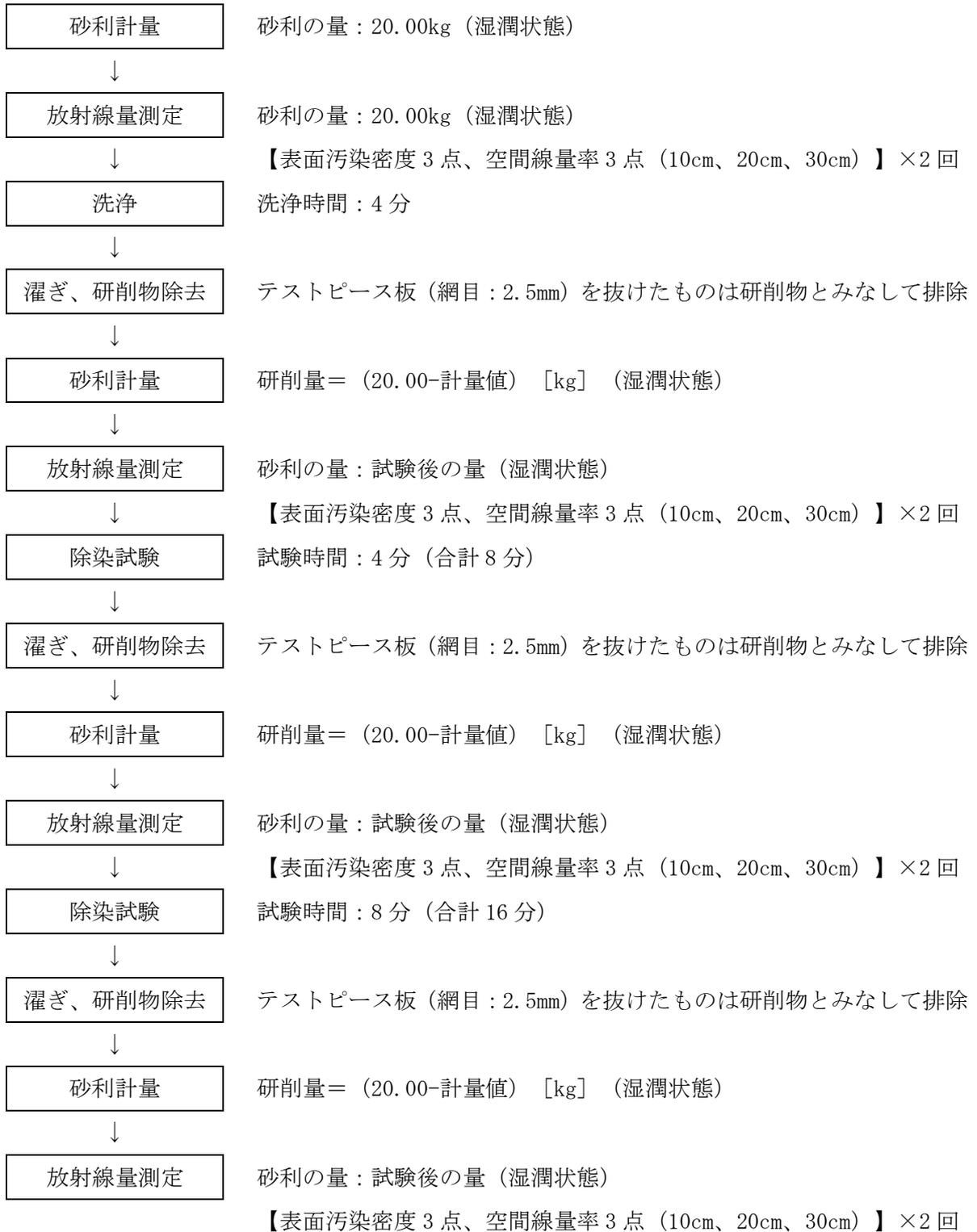


図 2.45 同一砂利での除染時間変化試験フロー

砂利を水で濡らしてから、試験前測定として砂利の重量及び放射線量を測定した。測定終了後、全体量が 20kg の砂利をポットミキサーに充填した。さらにポットミキサーからこぼれない程度の水を充填した。高圧及び超高圧水洗浄機を使用する場合は、ハンドガンセットし、砂利にハ

ノズルのノズルから噴出した水が十分に当たるように調整をした。

調整完了後、ポットミキサーを運転しながら4分間洗浄を行った。

洗浄終了後、ポットミキサーから砂利を取り出してきれいな水で濯ぎ、軽く水を切った状態で砂利全体の重量及び放射線量を測定した。

測定終了後、砂利をポットミキサーに戻して、再度4分間（合計8分）運転しながら洗浄を行い、同様に濯ぎ、水切り、計量、放射線量測定を順に実施した。

さらに、砂利をポットミキサーに戻して、最後に8分間（合計16分）運転しながら洗浄を行い、同様に濯ぎ、水切り、計量、放射線量測定を順に実施した。

放射線量の測定は、前項の測定方法と同様に行った。但し、砂利の量は15kgで統一でなく、測定時の砂利を全てバケツに入れた状態で測定を行った。

これは、砂利全体での研削率を求めることからバラつきを少なくするためである。前項では割れた砂利を排除していたが、本項では、砂利の研削物や割れに関係なく、除染試験の砂利排出時に網目2.5mmのテストピース板（写真2.21）を抜けたものは研削物とする条件を決め、除染試験で使用機械により研削されたと見なすよりも、他の原因で割れてしまった砂利も含まれる。割れた砂利は重量が大きいので、排除すると研削率に関わってくると考えたためである。



テストピース板全景



網目 2.5mm

写真 2.21 砂利排出用テストピース板

(4) 試験状況

試験状況を写真 2.22 に示す。



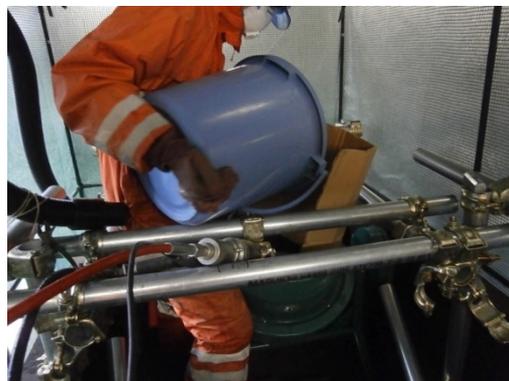
砂利重量測定 (試験前)



使用装置 (高圧水洗浄機)



使用装置 (超高圧水洗浄機)



砂利投入



試験状況 (ポットミキサー)



試験状況 (高圧水洗浄機)

写真 2.22 試験状況 (1/2)



試験状況（超高压水洗浄機）



砂利排出



砂利排出後



濯ぎ



水切り



砂利重量測定（試験後）

写真 2.22 試験状況（2/2）

(5) 試験結果

(5)-1) リフレ富岡の砂利の低減率

a) 表面汚染密度

図 2.46 に、リフレ富岡で採取した砂利を使用した同一砂利による洗浄時間の違いにおける表面汚染密度の低減率の変化、表 2.40 に各洗浄時間における除染前後の表面汚染密度と算出した低減率を示す。

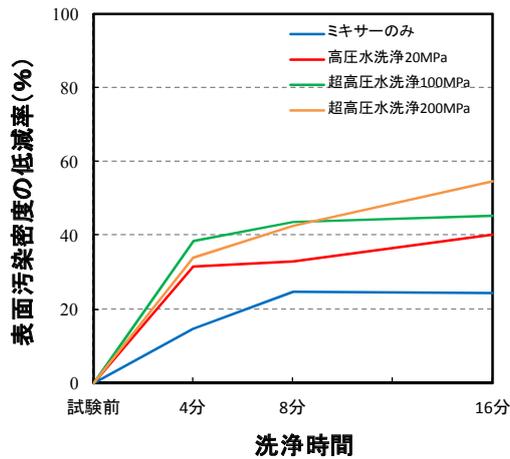


図 2.46 同一砂利の洗淨時間における表面汚染密度の低減率（リフレ富岡）

表 2.40 同一砂利の洗淨時間における表面汚染密度と低減率（リフレ富岡）

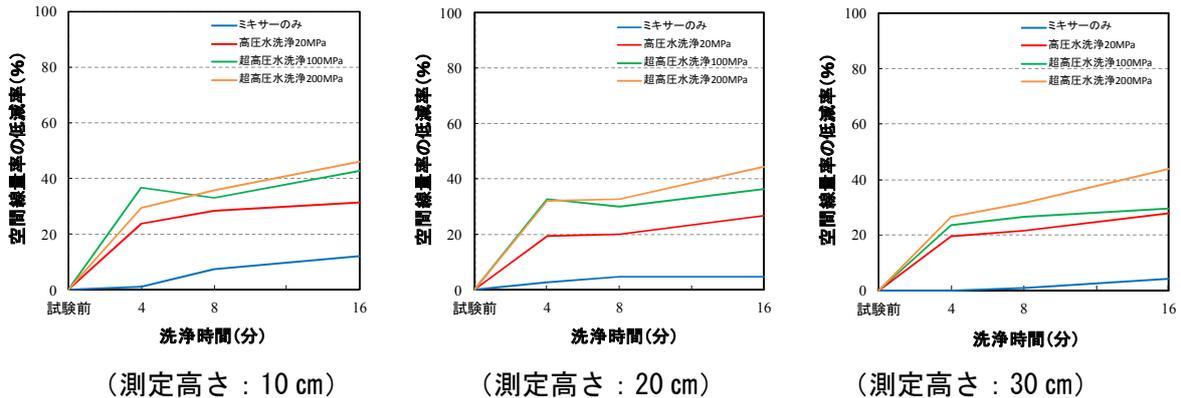
使用機械	表面汚染密度 (cpm)			
	試験前	4分	8分	16分
ミキサーのみ	7413	6331	5576	5619
低減率 (%)	0	15	25	24
高圧水洗浄 20MPa	6332	4333	4240	3798
低減率 (%)	0	32	33	40
超高圧水洗浄 100MPa	4374	2686	2469	2387
低減率 (%)	0	39	44	45
超高圧水洗浄 200MPa	6595	4364	3782	3004
低減率 (%)	0	34	43	54

リフレ富岡で採取した砂利の表面汚染密度の低減率は、試験した全ての方法において洗淨時間と共に低減率が増加する傾向を確認できた。前項では、洗淨時間の途中で低減率が低下する傾向が一部確認されたが、本項で行った同一砂利を用いた連続洗淨では低減率が低下することなく増加または一定になることが分かった。

ポットミキサーのみの工法では洗淨時間 8 分で約 25% の低減率となり、それ以降は殆ど変わらない結果になった。また、ポットミキサーと高圧または超高圧水洗浄機を組み合わせた方法は、洗淨 4 分後まで急激に低減率が増加し、それ以降からは緩やかな増加に変化した。

b) 空間線量率

図 2.47 にリフレ富岡の砂利を使用した同一砂利による洗淨時間の違いにおける空間線量率の低減率の変化、表 2.41 に各洗淨時間における除染前後の空間線量率と算出した低減率を示す。



(測定高さ : 10 cm) (測定高さ : 20 cm) (測定高さ : 30 cm)

図 2.47 同一砂利の洗浄時間における空間線量率の低減率の変化

表 2.41 同一砂利の洗浄時間における空間線量率と低減率（リフレ富岡）

測定高さ (cm)	使用機械	空間線量率 (μSv/h)			
		試験前	4分	8分	16分
10	ミキサーのみ	3.61	3.57	3.34	3.17
	低減率 (%)	0	1	7	12
	高圧水洗浄 20MPa	3.65	2.79	2.61	2.51
	低減率 (%)	0	24	28	31
	超高压水洗浄 100MPa	2.51	1.59	1.68	1.44
	低減率 (%)	0	37	33	43
	超高压水洗浄 200MPa	3.74	2.64	2.41	2.02
	低減率 (%)	0	29	36	46
20	ミキサーのみ	1.71	1.66	1.63	1.63
	低減率 (%)	0	3	5	5
	高圧水洗浄 20MPa	1.60	1.29	1.28	1.17
	低減率 (%)	0	19	20	27
	超高压水洗浄 100MPa	1.13	0.76	0.79	0.72
	低減率 (%)	0	33	30	36
	超高压水洗浄 200MPa	1.80	1.22	1.21	1.00
	低減率 (%)	0	32	33	44
30	ミキサーのみ	0.98	0.98	0.97	0.94
	低減率 (%)	0	0	1	4
	高圧水洗浄 20MPa	0.97	0.78	0.76	0.70
	低減率 (%)	0	20	22	28
	超高压水洗浄 100MPa	0.64	0.49	0.47	0.45
	低減率 (%)	0	23	27	30
	超高压水洗浄 200MPa	1.05	0.77	0.72	0.59
	低減率 (%)	0	27	31	44

リフレ富岡で採取した砂利の空間線量率の低減率も、表面汚染密度と同様な傾向で低減率が増加することを確認できた。

(5)-2) 夜ノ森駅の砂利の低減率

a) 表面汚染密度

図 2.48 に夜ノ森駅で採取した砂利を使用した同一砂利による洗浄時間の違いにおける表面汚染密度の低減率の変化、表 2.42 に各洗浄時間における除染前後の表面汚染密度と算出した低減率を示す。

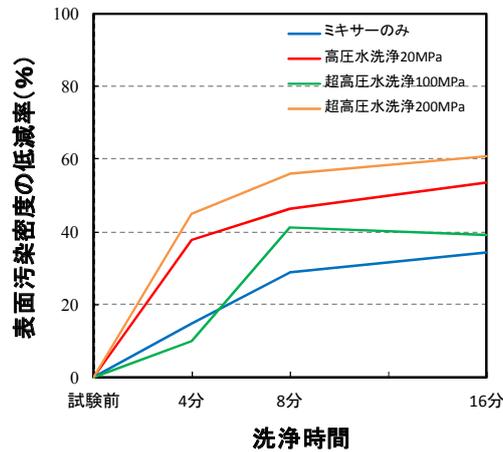


図 2.48 同一砂利の洗浄時間における表面汚染密度の低減率の変化（夜ノ森駅）

表 2.42 同一砂利の洗浄時間における表面汚染密度と低減率（夜ノ森駅）

使用機械	表面汚染密度 (cpm)			
	試験前	4分	8分	16分
ミキサーのみ	4162	3540	2967	2734
低減率 (%)	0	15	29	34
高圧水洗浄 20MPa	5597	3486	3003	2589
低減率 (%)	0	38	46	54
超高圧水洗浄 100MPa	4134	3728	2432	2521
低減率 (%)	0	10	41	39
超高圧水洗浄 200MPa	3586	1978	1573	1411
低減率 (%)	0	45	56	61

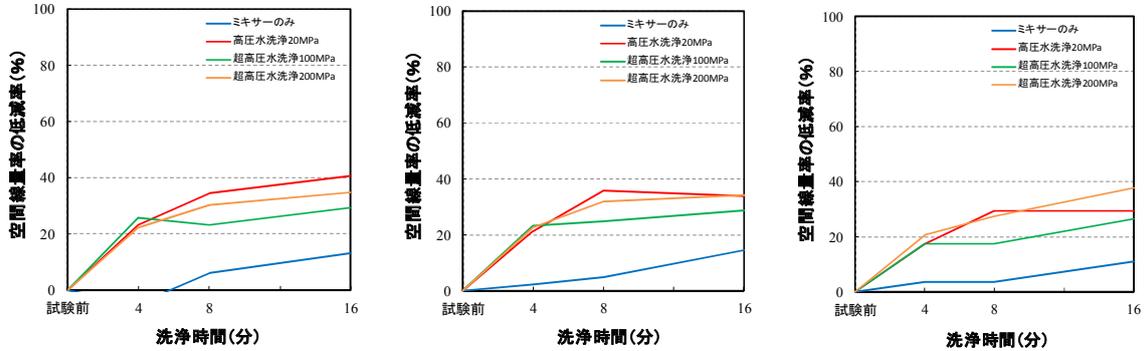
夜ノ森駅で採取した砂利の表面汚染密度の低減率は、ポットミキサーと高圧または超高圧水洗浄機（200MPa）を組み合わせた工法は、洗浄 4 分後まで急激に低減率が増加し、それ以降からは緩やかな増加に変化した。

ポットミキサーのみの工法では洗浄時間 16 分で約 30% 台の低減率となった。

また、ポットミキサーと超高圧水洗浄機（100MPa）を組み合わせた工法は、洗浄 8 分後以降からは殆ど変わらない傾向を示した。

b) 空間線量率

図 2.49 に夜ノ森駅の砂利を使用した同一砂利による洗浄時間の違いにおける空間線量率の低減率の変化、表 2.43 に各洗浄時間における除染前後の空間線量率と算出した低減率を示す。



(測定高さ : 10 cm)                      (測定高さ : 20 cm)                      (測定高さ : 30 cm)

図 2.49 同一砂利の洗浄時間における空間線量率の低減率の変化

表 2.43 同一砂利の洗浄時間における空間線量率と低減率 (夜ノ森駅)

測定高さ (cm)	使用機械	空間線量率 (μSv/h)			
		試験前	4分	8分	16分
10	ミキサーのみ	0.84	0.88	0.79	0.73
	低減率 (%)	0	-5	6	13
	高圧水洗浄 20MPa	1.16	0.89	0.76	0.69
	低減率 (%)	0	23	34	41
	超高压水洗浄 100MPa	1.16	0.86	0.89	0.82
	低減率 (%)	0	26	23	29
	超高压水洗浄 200MPa	0.86	0.67	0.60	0.56
低減率 (%)	0	22	30	35	
20	ミキサーのみ	0.41	0.40	0.39	0.35
	低減率 (%)	0	2	5	15
	高圧水洗浄 20MPa	0.56	0.44	0.36	0.37
	低減率 (%)	0	21	36	34
	超高压水洗浄 100MPa	0.56	0.43	0.42	0.40
	低減率 (%)	0	23	25	29
	超高压水洗浄 200MPa	0.44	0.34	0.30	0.29
低減率 (%)	0	23	32	34	
30	ミキサーのみ	0.27	0.26	0.26	0.24
	低減率 (%)	0	4	4	11
	高圧水洗浄 20MPa	0.34	0.28	0.24	0.24
	低減率 (%)	0	18	29	29
	超高压水洗浄 100MPa	0.34	0.28	0.28	0.25
	低減率 (%)	0	18	18	26
	超高压水洗浄 200MPa	0.29	0.23	0.21	0.18
低減率 (%)	0	21	28	38	

夜ノ森駅で採取した砂利の空間線量率の低減率は、ポットミキサーと高圧または超高压水洗浄機（200MPa）を組み合わせた工法は、洗浄 8 分後まで急激に低減率が増加し、それ以降からは緩やかな増加に変化した。

ポットミキサーのみの工法では洗浄時間 16 分で約 10% 台の低減率となった。

また、ポットミキサーと超高压水洗浄機（100MPa）を組み合わせた工法は、洗浄 4 分後まで急激に低減率が増加し、それ以降からは緩やかな増加に変化した。

(5)-3) 太田陸前浜街道踏切の砂利の低減率

a) 表面汚染密度

図 2.50 に太田陸前浜街道踏切で採取した砂利を使用した同一砂利による洗浄時間の違いにおける表面汚染密度の低減率の変化、表 2.44 に各洗浄時間における除染前後の表面汚染密度と算出した低減率を示す。

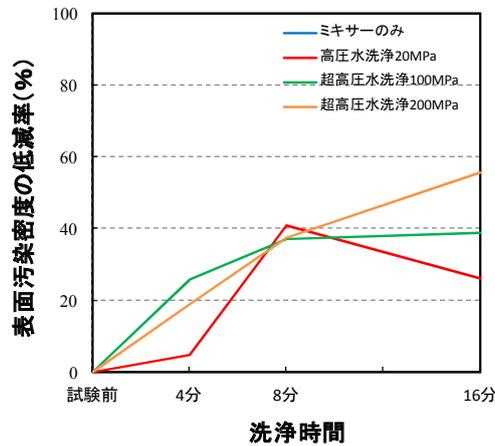


図 2.50 同一砂利の洗浄時間における表面汚染密度の低減率の変化（太田陸前浜街道踏切）

表 2.44 同一砂利の洗浄時間における表面汚染密度と低減率（太田陸前浜街道踏切）

使用機械	表面汚染密度 (cpm)			
	試験前	4分	8分	16分
ミキサーのみ	849	1007	961	909
低減率 (%)	0	-19	-13	-7
高圧水洗浄 20MPa	1055	1004	624	781
低減率 (%)	0	5	41	26
超高压水洗浄 100MPa	917	680	576	561
低減率 (%)	0	26	37	39
超高压水洗浄 200MPa	1011	820	632	450
低減率 (%)	0	19	37	55

太田陸前浜街道踏切で採取した砂利の表面汚染密度の低減率は、ポットミキサーと超高压水洗

浄機（200MPa）を組み合わせた工法は、洗浄時間と共に低減率が増加した。

ポットミキサーと超高压水洗浄機（100MPa）を組み合わせた工法は、洗浄 8 分後以降からは殆ど変わらない傾向を示した。

また、ポットミキサーのみやポットミキサーと高压水洗浄機を組み合わせた工法は、洗浄時間ごとに測定値が上下に変動した。これは太田陸前浜街道踏切の石は元々の汚染レベルが低く、除染効果が放射線量のバラツキの範囲内に入っていると考える。

b) 空間線量率

図 2.51 に太田陸前浜街道踏切の砂利を使用した同一砂利による洗浄時間の違いにおける空間線量率の低減率の変化、表 2.45 に各洗浄時間における除染前後の空間線量率と算出した低減率を示す。

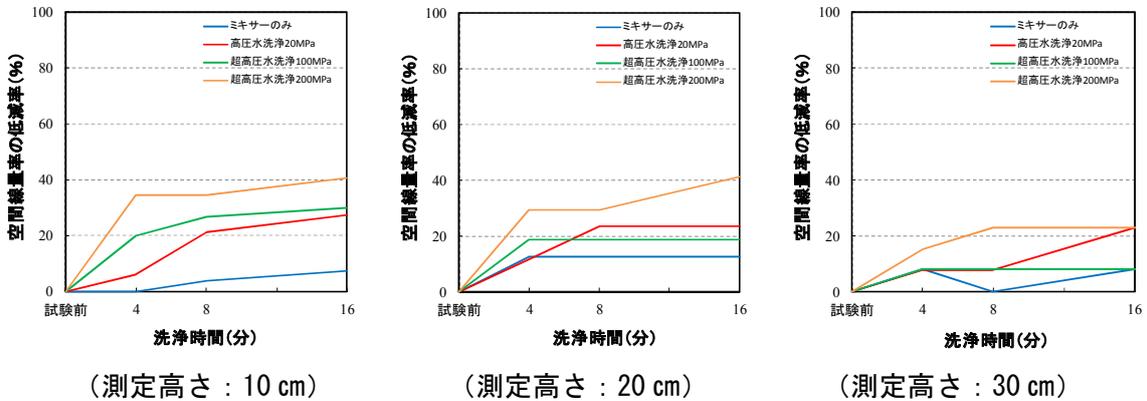


図 2.51 同一砂利の洗浄時間における空間線量率の低減率の変化

表 2.45 同一砂利の洗浄時間における空間線量率と低減率（太田陸前浜街道踏切）（1/2）

測定高さ (cm)	使用機械	空間線量率 (μSv/h)			
		試験前	4分	8分	16分
10	ミキサーのみ	0.27	0.27	0.26	0.25
	低減率 (%)	0	0	4	7
	高压水洗浄 20MPa	0.33	0.31	0.26	0.24
	低減率 (%)	0	6	21	27
	超高压水洗浄 100MPa	0.30	0.24	0.22	0.21
	低減率 (%)	0	20	27	30
	超高压水洗浄 200MPa	0.32	0.21	0.21	0.19
低減率 (%)	0	34	34	41	
20	ミキサーのみ	0.16	0.14	0.14	0.14
	低減率 (%)	0	13	13	13
	高压水洗浄 20MPa	0.17	0.15	0.13	0.13
	低減率 (%)	0	12	24	24
	超高压水洗浄 100MPa	0.16	0.13	0.13	0.13
	低減率 (%)	0	19	19	19
	超高压水洗浄 200MPa	0.17	0.12	0.12	0.10
低減率 (%)	0	29	29	41	

表 2.45 同一砂利の洗浄時間における空間線量率と低減率（太田陸前浜街道踏切）（2/2）

測定高さ (cm)	使用機械	空間線量率 ( $\mu$ Sv/h)			
		試験前	4分	8分	16分
30	ミキサーのみ	0.12	0.11	0.12	0.11
	低減率 (%)	0	8	0	8
	高圧水洗浄 20MPa	0.13	0.12	0.12	0.10
	低減率 (%)	0	8	8	23
	超高压水洗浄 100MPa	0.12	0.11	0.11	0.11
	低減率 (%)	0	8	8	8
	超高压水洗浄 200MPa	0.13	0.11	0.10	0.10
	低減率 (%)	0	15	23	23

太田陸前浜街道踏切で採取した砂利の空間線量率の低減率はポットミキサーと高圧または超高压水洗浄機を組み合わせた工法は、洗浄 4~8 分後まで急激に低減率が増加し、それ以降からは緩やかな増加または一定に変化した。

また、測定高さ 30cm の結果では洗浄時間ごとに測定値が上下に変動した。これは太田陸前浜街道踏切の石は元々の汚染レベルが低く、除染効果が放射線量のバラツキの範囲内に入っていると考える。

(5)-4) ポットミキサーで洗浄した各砂利の低減率

a) 表面汚染密度

ポットミキサーのみで洗浄攪拌した各砂利における表面汚染密度の低減率を図 2.52、表 2.46 にそれぞれ示す。

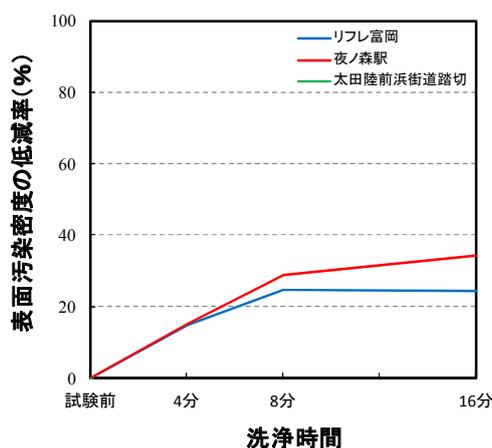


図 2.52 同一砂利の洗浄時間における表面汚染密度の低減率の変化（ポットミキサー）

表 2.46 同一砂利の洗浄時間における表面汚染密度と低減率（ポットミキサー）

砂利の種類	表面汚染密度 (cpm)			
	試験前	4分	8分	16分
リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	7413	6331	5576	5619
低減率 (%)	0	15	25	24
夜ノ森駅	4162	3540	2967	2734
低減率 (%)	0	15	29	34
太田陸前浜街道踏切	849	1007	961	909
低減率 (%)	0	-19	-13	-7

ポットミキサーのみで各種砂利を洗浄した表面汚染密度の低減率は、リフレ富岡及び夜ノ森駅の砂利は洗浄時間とともに低減率が増加した。

太田陸前浜街道踏切の砂利は低減率が負の値を示した。これは太田陸前浜街道踏切の石は元々の汚染レベルが低く、除染効果が放射線量のバラツキの範囲内に入っていると考える。

b) 空間線量率

ポットミキサーのみで洗浄攪拌した砂利における空間線量率の低減率を図 2.53、表 2.47 にそれぞれ示す。

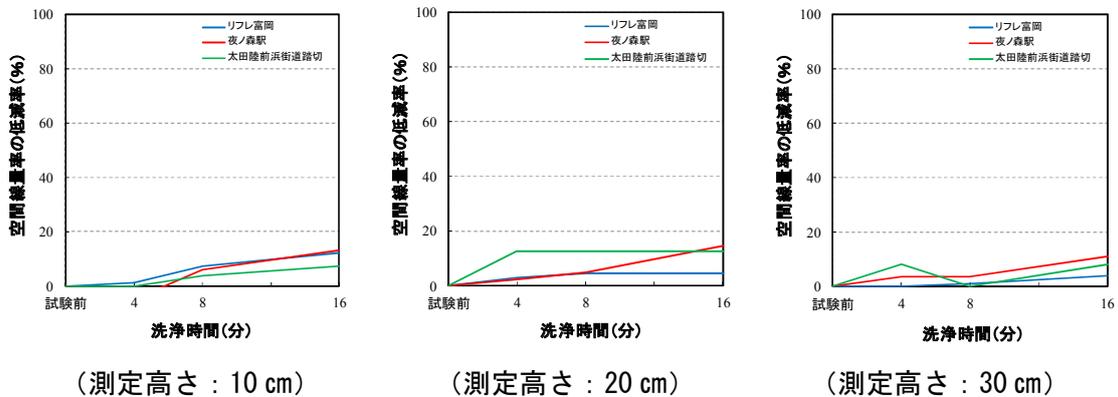


図 2.53 同一砂利の洗浄時間における空間線量率の低減率の変化（ポットミキサー）

表 2.47 同一砂利の洗浄時間における空間線量率と低減率（ポットミキサー）(1/2)

測定高さ (cm)	砂利の種類	空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )			
		試験前	4分	8分	16分
10	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	3.61	3.57	3.34	3.17
	低減率 (%)	0	1	7	12
	夜ノ森駅	0.84	0.88	0.79	0.73
	低減率 (%)	0	-5	6	13
	太田陸前浜街道踏切	0.27	0.27	0.26	0.25
	低減率 (%)	0	0	4	7

表 2.47 同一砂利の洗浄時間における空間線量率と低減率（ポットミキサー）（2/2）

測定高さ (cm)	砂利の種類	空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )			
		試験前	4分	8分	16分
20	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	1.71	1.66	1.63	1.63
	低減率 (%)	0	3	5	5
	夜ノ森駅	0.41	0.40	0.39	0.35
	低減率 (%)	0	2	5	15
	太田陸前浜街道踏切	0.16	0.14	0.14	0.14
	低減率 (%)	0	13	13	13
30	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	0.98	0.98	0.97	0.94
	低減率 (%)	0	0	1	4
	夜ノ森駅	0.27	0.26	0.26	0.24
	低減率 (%)	0	4	4	11
	太田陸前浜街道踏切	0.12	0.11	0.12	0.11
	低減率 (%)	0	8	0	8

ポットミキサーのみで各種砂利を洗浄した空間線量率の低減率は、表面汚染密度の結果と同様にリフレ富岡及び夜ノ森駅の砂利は洗浄時間とともに低減率が増加した。

低減率は全体的に 20%以下と低い値を示しているが、洗浄時間とともに低減率が増加する傾向も確認できたため、攪拌洗浄により、石の表面に付着した汚れ等が除去されていると考える。

しかし、測定高さ 10 cmで洗浄時間 4 分の夜ノ森駅の砂利の試験結果は負の値を示したこと、また低減率の数値が洗浄時間とともに増加していない部分もあることから、石一個に対しては不均等な洗浄になっていると推察される。

(5)-5) 高圧水洗浄機 (20MPa) で洗浄した各砂利の低減率

a) 表面汚染密度

高圧水洗浄機で洗浄した砂利における表面汚染密度の低減率を図 2.54、表 2.48 にそれぞれ示す。

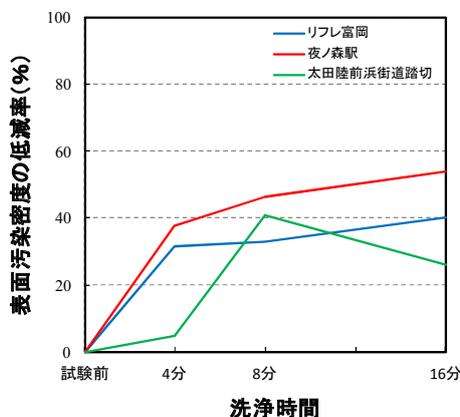


図 2.54 同一砂利の洗浄時間における表面汚染密度の低減率の変化（高圧水洗浄機）

表 2.48 同一砂利の洗浄時間における表面汚染密度と低減率（高圧水洗浄機）

砂利の種類	表面汚染密度 (cpm)			
	試験前	4分	8分	16分
リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	6332	4333	4240	3798
低減率 (%)	0	32	33	40
夜ノ森駅	5597	3486	3003	2589
低減率 (%)	0	38	46	54
太田陸前浜街道踏切	1055	1004	624	781
低減率 (%)	0	5	41	26

ポットミキサーと高圧水洗浄機を組み合わせた工法で各種砂利を洗浄した表面汚染密度の低減率は、リフレ富岡及び夜ノ森駅の砂利は洗浄時間とともに低減率が増加した。

太田陸前浜街道踏切の砂利は低減率が洗浄時間ごとに測定値が上下に変動した。これは太田陸前浜街道踏切の石は元々の汚染レベルが低く、除染効果が放射線量のバラツキの範囲内に入っていると考える。

b) 空間線量率

高圧水洗浄機で洗浄した砂利における空間線量率の低減率を図 2.55、表 2.49 にそれぞれ示す。

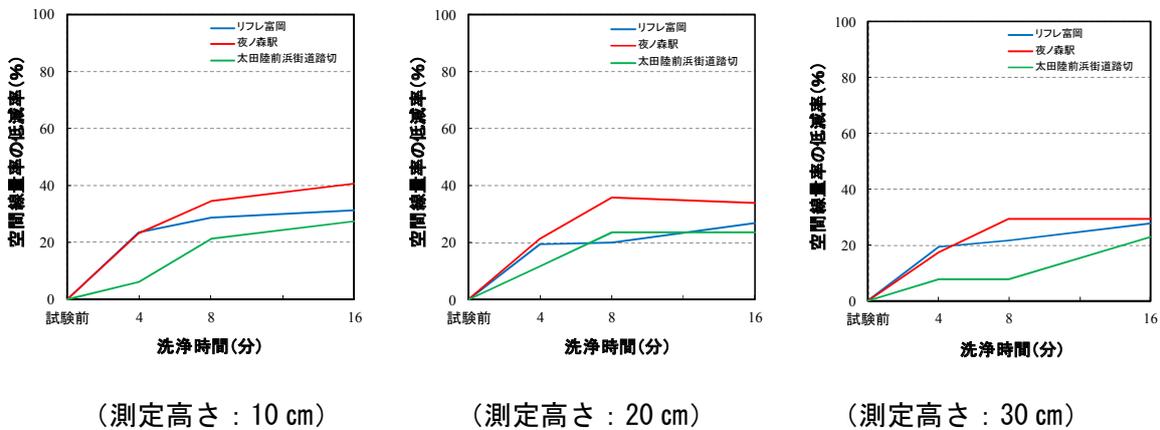


図 2.55 同一砂利の洗浄時間における空間線量率の低減率の変化（高圧水洗浄機）

表 2.49 同一砂利の洗浄時間における空間線量率と低減率（高圧水洗浄機）

測定高さ (cm)	砂利の種類	空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )			
		試験前	4分	8分	16分
10	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	3.65	2.79	2.61	2.51
	低減率 (%)	0	24	28	31
	夜ノ森駅	1.16	0.89	0.76	0.69
	低減率 (%)	0	23	34	41
	太田陸前浜街道踏切	0.33	0.31	0.26	0.24
低減率 (%)	0	6	21	27	
20	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	1.60	1.29	1.28	1.17
	低減率 (%)	0	19	20	27
	夜ノ森駅	0.56	0.44	0.36	0.37
	低減率 (%)	0	21	36	34
	太田陸前浜街道踏切	0.17	0.15	0.13	0.13
低減率 (%)	0	12	24	24	
30	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	0.97	0.78	0.76	0.70
	低減率 (%)	0	20	22	28
	夜ノ森駅	0.34	0.28	0.24	0.24
	低減率 (%)	0	18	29	29
	太田陸前浜街道踏切	0.13	0.12	0.12	0.10
低減率 (%)	0	8	8	23	

ポットミキサーと高圧水洗浄機を組み合わせた工法で各種砂利を洗浄した空間線量率の低減率は、洗浄時間とともに低減率が増加した。

洗浄 4～8 分後まで急激に低減率が増加し、それ以降からは緩やかな増加または一定に変化した。

#### (5)-6) 超高压水洗浄機 (100MPa) にて洗浄した各砂利の低減率

##### a) 表面汚染密度

超高压水洗浄機 (100MPa) で洗浄した砂利における表面汚染密度の低減率を図 2.56、表 2.50 にそれぞれ示す。

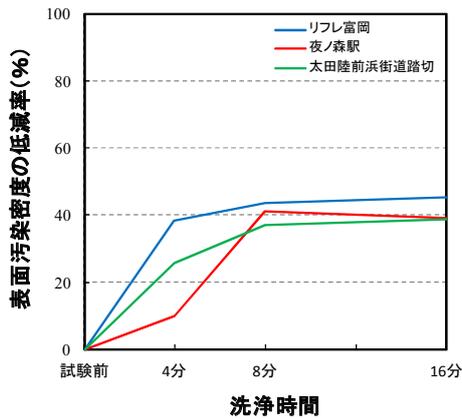


図 2.56 同一砂利の洗淨時間における表面汚染密度の低減率の変化  
(超高压水洗浄機 100MPa)

表 2.50 同一砂利の洗淨時間における表面汚染密度と低減率 (超高压水洗浄機 100MPa)

砂利の種類	表面汚染密度 (cpm)			
	試験前	4分	8分	16分
リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	4374	2686	2469	2387
低減率 (%)	0	39	44	45
夜ノ森駅	4134	3728	2432	2521
低減率 (%)	0	10	41	39
太田陸前浜街道踏切	917	680	576	561
低減率 (%)	0	26	37	39

ポットミキサーと超高压水洗浄機 (100MPa) を組み合わせた工法で各種砂利を洗淨した表面汚染密度の低減率は、洗淨時間とともに低減率が増加した。

洗淨 4~8 分後まで急激に低減率が増加し、それ以降からは緩やかな増加または一定に変化した。

b) 空間線量率

超高压水洗浄機 (100MPa) で洗淨した砂利における空間線量率の低減率を図 2.57、表 2.51 にそれぞれ示す。

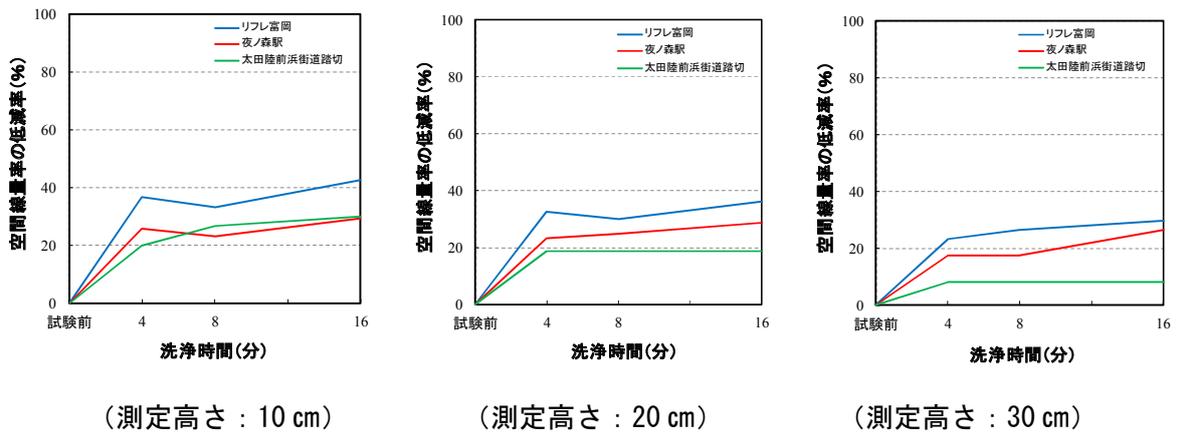


図 2.57 同一砂利の洗浄時間における空間線量率の低減率の変化 (超高压水洗浄機 100MPa)

表 2.51 同一砂利の洗浄時間における空間線量率と低減率 (超高压水洗浄機 100MPa)

測定高さ (cm)	砂利の種類	空間線量率 (μSv/h)			
		試験前	4分	8分	16分
10	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	2.51	1.59	1.68	1.44
	低減率 (%)	0	37	33	43
	夜ノ森駅	1.16	0.86	0.89	0.82
	低減率 (%)	0	26	23	29
	太田陸前浜街道踏切	0.30	0.24	0.22	0.21
	低減率 (%)	0	20	27	30
20	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	1.13	0.76	0.79	0.72
	低減率 (%)	0	33	30	36
	夜ノ森駅	0.56	0.43	0.42	0.40
	低減率 (%)	0	23	25	29
	太田陸前浜街道踏切	0.16	0.13	0.13	0.13
	低減率 (%)	0	19	19	19
30	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	0.64	0.49	0.47	0.45
	低減率 (%)	0	23	27	30
	夜ノ森駅	0.34	0.28	0.28	0.25
	低減率 (%)	0	18	18	26
	太田陸前浜街道踏切	0.12	0.11	0.11	0.11
	低減率 (%)	0	8	8	8

ポットミキサーと超高压水洗浄機 (100MPa) を組み合わせた工法で各種砂利を洗浄した空間線量率の低減率は、洗浄時間とともに低減率が増加した。

洗浄 4 分後まで急激に低減率が増加し、それ以降からは緩やかな増加または一定に変化した。

(5)-7) 超高压水洗净機 (200MPa) にて洗净した各砂利の低減率

a) 表面汚染密度

超高压水洗净機 (200MPa) で洗净した砂利における表面汚染密度の低減率を図 2.58、表 2.52 にそれぞれ示す。

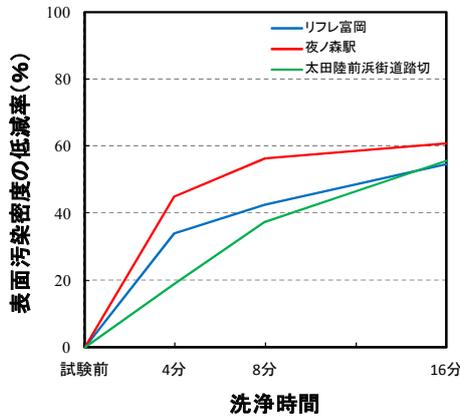


図 2.58 同一砂利の洗净時間における表面汚染密度の低減率の変化 (超高压水洗净機 200MPa)

表 2.52 同一砂利の洗净時間における表面汚染密度と低減率 (超高压水洗净機 200MPa)

砂利の種類	表面汚染密度 (cpm)			
	試験前	4分	8分	16分
リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	6595	4364	3782	3004
低減率 (%)	0	34	43	54
夜ノ森駅	3586	1978	1573	1411
低減率 (%)	0	45	56	61
太田陸前浜街道踏切	1011	820	632	450
低減率 (%)	0	19	37	55

ポットミキサーと超高压水洗净機 (200MPa) を組み合わせた工法で各種砂利を洗净した表面汚染密度の低減率は、洗净時間とともに低減率が増加した。

洗净 4~8 分後まで急激に低減率が増加し、それ以降からは若干緩やかな増加に変化した。他の工法と比べると、洗净時間 8 分後以降も低減率の増加が比較的大きいため、砂利の研削による除染効果が表れていると推察する。

b) 空間線量率

超高压水洗净機 (200MPa) で洗净した砂利における空間線量率の低減率を図 2.59、表 2.53 にそれぞれ示す。

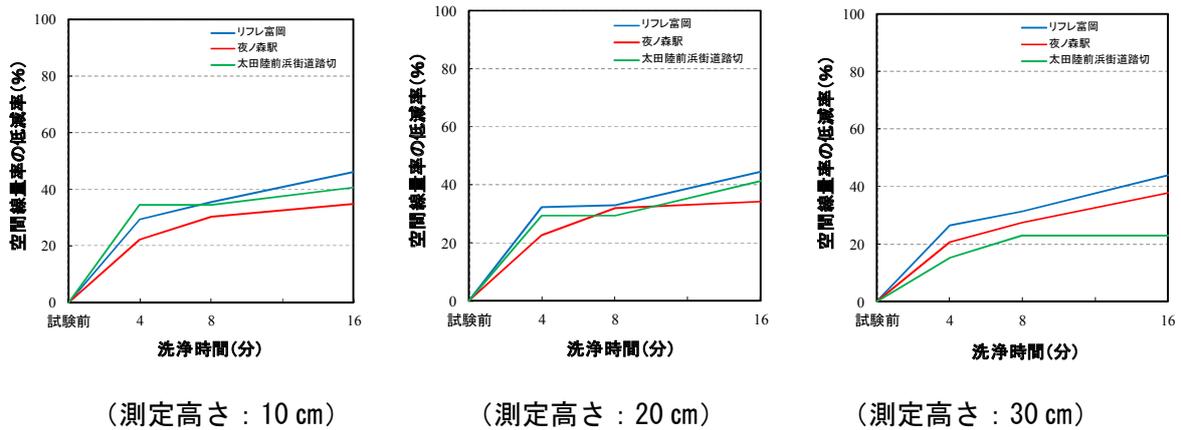


図 2.59 同一砂利の洗浄時間における空間線量率の低減率の変化 (超高压水洗浄機 200MPa)

表 2.53 同一砂利の洗浄時間における空間線量率と低減率 (超高压水洗浄機 200MPa)

測定高さ (cm)	砂利の種類	空間線量率 (μSv/h)			
		試験前	4分	8分	16分
10	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	3.74	2.64	2.41	2.02
	低減率 (%)	0	29	36	46
	夜ノ森駅	0.86	0.67	0.60	0.56
	低減率 (%)	0	22	30	35
	太田陸前浜街道踏切	0.32	0.21	0.21	0.19
低減率 (%)	0	34	34	41	
20	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	1.80	1.22	1.21	1.00
	低減率 (%)	0	32	33	44
	夜ノ森駅	0.44	0.34	0.30	0.29
	低減率 (%)	0	23	32	34
	太田陸前浜街道踏切	0.17	0.12	0.12	0.10
低減率 (%)	0	29	29	41	
30	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	1.05	0.77	0.72	0.59
	低減率 (%)	0	27	31	44
	夜ノ森駅	0.29	0.23	0.21	0.18
	低減率 (%)	0	21	28	38
	太田陸前浜街道踏切	0.13	0.11	0.10	0.10
低減率 (%)	0	15	23	23	

ポットミキサーと超高压水洗浄機 (200MPa) を組み合わせた工法で各種砂利を洗浄した空間線量率の低減率は、洗浄時間とともに低減率が増加した。

洗浄 4~8 分後まで急激に低減率が増加し、それ以降からは緩やかな増加または一定に変化した。

(5)-8) 研削率の測定結果

a) 各種砂利の研削率

本項で試験した各種砂利の使用機械別における研削率の変化を図 2.60、表 2.54 にそれぞれ示す。

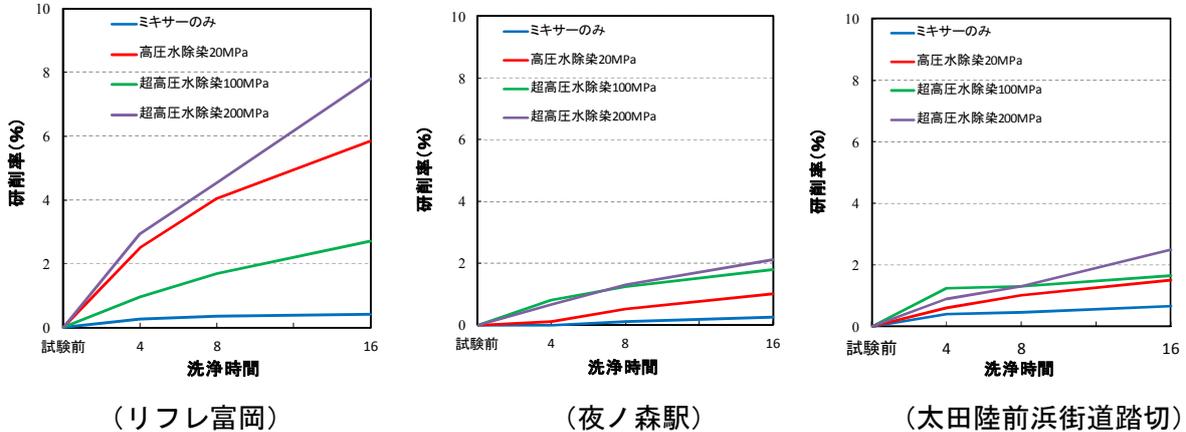


図 2.60 各種砂利の使用機械別における研削率の変化

表 2.54 各種砂利の使用機械別における研削率

砂利の種類	使用機械	単位	洗浄時間		
			4分	8分	16分
リフレ富岡 宿泊棟 雨だれ部	ミキサーのみ	kg	19.95	19.93	19.92
		研削率 (%)	0.3	0.4	0.4
	高压水洗浄 20MPa	kg	19.50	19.19	18.83
		研削率 (%)	2.5	4.0	5.9
	超高压水洗浄 100MPa	kg	19.81	19.66	19.46
		研削率 (%)	1.0	1.7	2.7
	超高压水洗浄 200MPa	kg	19.41	19.09	18.44
		研削率 (%)	3.0	4.6	7.8
夜ノ森駅	ミキサーのみ	kg	20.00	19.98	19.95
		研削率 (%)	0.0	0.1	0.3
	高压水洗浄 20MPa	kg	19.98	19.90	19.80
		研削率 (%)	0.1	0.5	1.0
	超高压水洗浄 100MPa	kg	19.84	19.75	19.64
		研削率 (%)	0.8	1.3	1.8
	超高压水洗浄 200MPa	kg	19.87	19.74	19.58
		研削率 (%)	0.6	1.3	2.1
太田陸前浜 街道踏切	ミキサーのみ	kg	19.92	19.91	19.87
		研削率 (%)	0.4	0.4	0.6
	高压水洗浄 20MPa	kg	19.88	19.80	19.70
		研削率 (%)	0.6	1.0	1.5
	超高压水洗浄 100MPa	kg	19.75	19.74	19.67
		研削率 (%)	1.3	1.3	1.6
	超高压水洗浄 200MPa	kg	19.82	19.74	19.50
		研削率 (%)	0.9	1.3	2.5

各種砂利別の研削率の結果は、全体として10%以下であるが、砂利別で比較するとリフレ富岡の砂利が高い研削率を示した。

特にポットミキサーと高圧または超高压水洗浄機（200MPa）を組み合わせた方法においては約3~8%の研削率であった。

バラスト（夜ノ森駅と太田陸前浜街道踏切）の砂利の研削率は、何れの使用機械においても約2.5%以下であった。

b) 各種使用機械の研削率

各種使用機械の砂利別における研削率の変化を図 2.61、表 2.55 にそれぞれ示す。

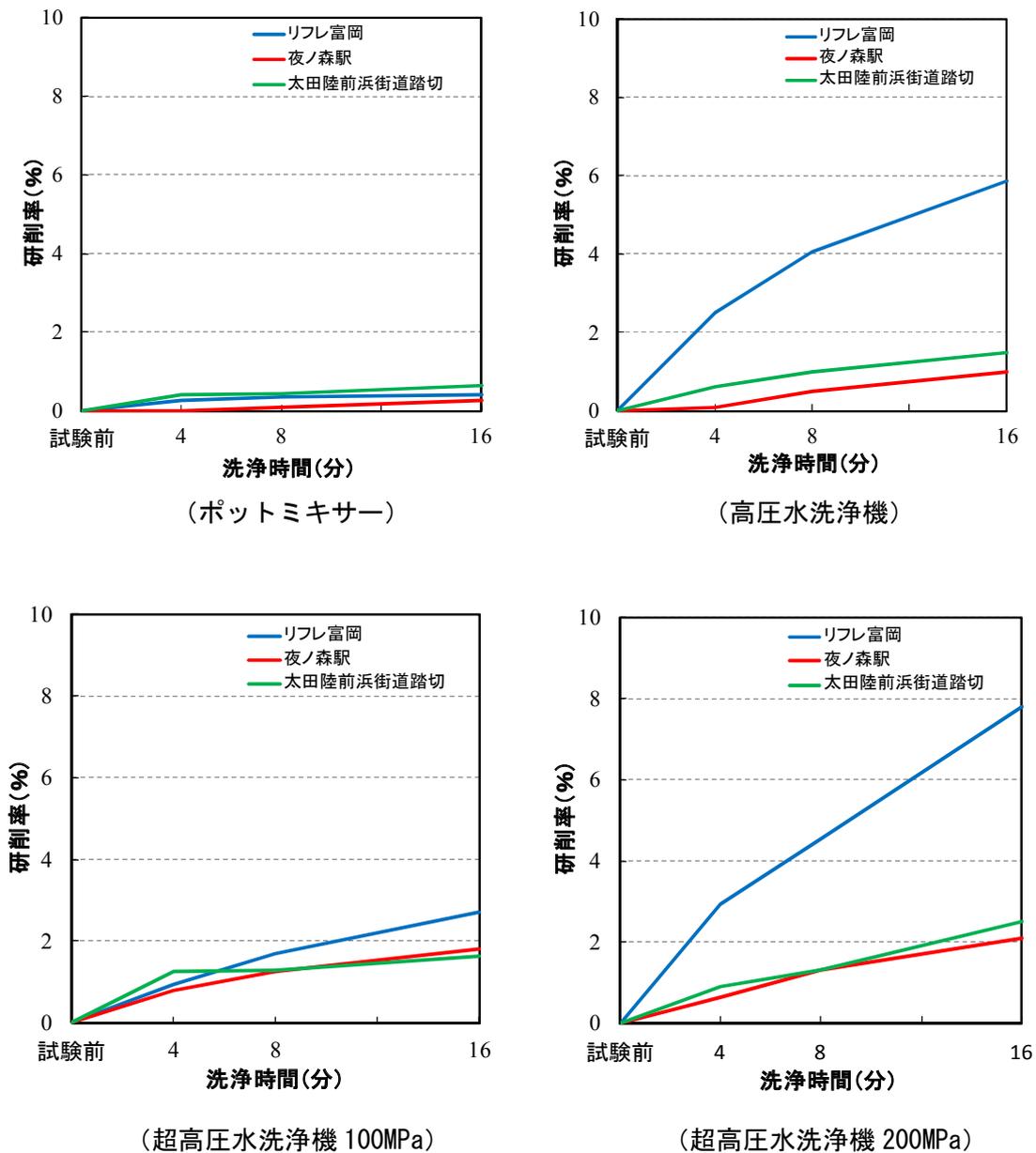


図 2.61 各種使用機械の砂利別における研削率の変化

表 2.55 各種使用機械の砂利別における研削率

使用機械	砂利の種類	単位	洗浄時間		
			4分	8分	16分
ミキサーのみ	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	kg	19.95	19.93	19.92
		研削率 (%)	0.3	0.4	0.4
	夜ノ森駅	kg	20.00	19.98	19.95
		研削率 (%)	0.0	0.1	0.3
	太田陸前浜 街道踏切	kg	19.92	19.91	19.87
		研削率 (%)	0.4	0.4	0.6
高圧水洗浄 20MPa	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	kg	19.50	19.19	18.83
		研削率 (%)	2.5	4.0	5.9
	夜ノ森駅	kg	19.98	19.90	19.80
		研削率 (%)	0.1	0.5	1.0
	太田陸前浜 街道踏切	kg	19.88	19.80	19.70
		研削率 (%)	0.6	1.0	1.5
超高压水洗浄 100MPa	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	kg	19.81	19.66	19.46
		研削率 (%)	1.0	1.7	2.7
	夜ノ森駅	kg	19.84	19.75	19.64
		研削率 (%)	0.8	1.3	1.8
	太田陸前浜 街道踏切	kg	19.75	19.74	19.67
		研削率 (%)	1.3	1.3	1.6
超高压水洗浄 200MPa	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	kg	19.41	19.09	18.44
		研削率 (%)	3.0	4.6	7.8
	夜ノ森駅	kg	19.87	19.74	19.58
		研削率 (%)	0.6	1.3	2.1
	太田陸前浜 街道踏切	kg	19.82	19.74	19.50
		研削率 (%)	0.9	1.3	2.5

各種使用機械別の研削率の結果は、ポットミキサーと高圧水洗浄機または超高压水洗浄機(200MPa)を組み合わせた工法が類似した傾向を示した。

超高压水洗浄機(100MPa)のリフレ富岡の砂利においての結果は、高圧水洗浄機よりも研削率が低い、これはリフレ富岡の砂利の割れの影響が大きいと考えられる。

## (6) 考察

本項では、同一の砂利を用いて除染時間の変化に伴う除染効果の検証を行った。

砂利の種類別で見ると、前項と同様に、洗浄開始から4分間の短時間で大幅に放射線量(表面汚染密度、空間線量率)が低下する傾向を示し、その後時間をかけて洗浄を行っても緩やかに低下または一定に変化する傾向となった。

また、石の材質や硬さ、形状の違いで研削率の違いが現れており、花崗岩であるリフレ富岡の砂利が、他の砂利と比較して高い研削率となった。

工法の違いで比較した場合、超高压水洗浄機(200MPa)の方が高圧水洗浄機よりも研削率が

高くなった。これは、測定方法の変更のためであるが、このことより、圧力が高いほど実際の研削効果は上がると考える。

しかし、リフレ富岡の砂利では、高圧水洗浄機の方が超高压水洗浄機（100MPa）よりも研削率が高くなった。これは、高圧洗浄機の水圧で砂利の表面を削るより、水量で砂利を押しつける力が大きく、砂利同士がぶつかった衝撃により割れてしまい、その割れた欠片がポットミキサー内に留まり、それを洗浄しきれなかったことが考えられる。

同じ砂利を使用し、連続して除染時間を変化させた場合で、かつ洗浄圧力と噴射水量を変化させた場合の除染効果の検証が必要である。

### 2.4.3.5 圧力と水量の違いにおける除染効果の確認

前項までの試験結果から、検証した工法が様々な形状・大きさの砂利に対して除染効果があることを確認できた。特にリフレ富岡で採取した楕円形状で大きさのある砂利や夜ノ森駅で採取した角がある比較的大きなバラスト等には、ポットミキサーで回転を加えながら同時に超高压水洗浄を行う除染方法が高い除染効果を得ることが分かった。

これまでの検証では超高压水洗浄機は、洗浄圧力及び水量を固定した形で試験を行ったが、この超高压水洗浄機は圧力と水量を可変でき、対象物に合わせた洗浄を行うことが可能である。この超高压水洗浄機の能力を最大限に生かし、さらに効率のよい除染工法が得られないか検証するため、洗浄圧力および噴射水量を変化させた場合の除染効果の違いを検証することとした。

#### (1) 砂利の種類

砂利は、2.1 節の図 2.1 に示した砂利のうち、リフレ富岡宿泊棟雨だれ部及び夜ノ森駅を使用した。

#### (2) 使用機械

使用機械は 2.2 節の図 2.3 に示した超高压水洗浄機の 2 種類及びポットミキサーを使用した。

#### (3) 試験方法

ポットミキサー及び超高压水洗浄機を組み合わせ、洗浄圧力と水量を変えてミキサー内の砂利を攪拌しながら洗浄した。

試験パターンを表 2.56 に、試験フローを図 2.62 に示す。

表 2.56 圧力・水量の違いにおける除染効果試験パターン

試験 No.	使用機械	圧力、ノズル番手	砂利の種類	試験時間
CR-3-1	ポットミキサー + 超高压水洗浄機	250MPa、#9	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	16 分
CY-3-1			夜ノ森駅	
CR-3-2		200MPa、#11	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	
CY-3-2			夜ノ森駅	
CR-3-3		200MPa、#17	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	
CY-3-3			夜ノ森駅	

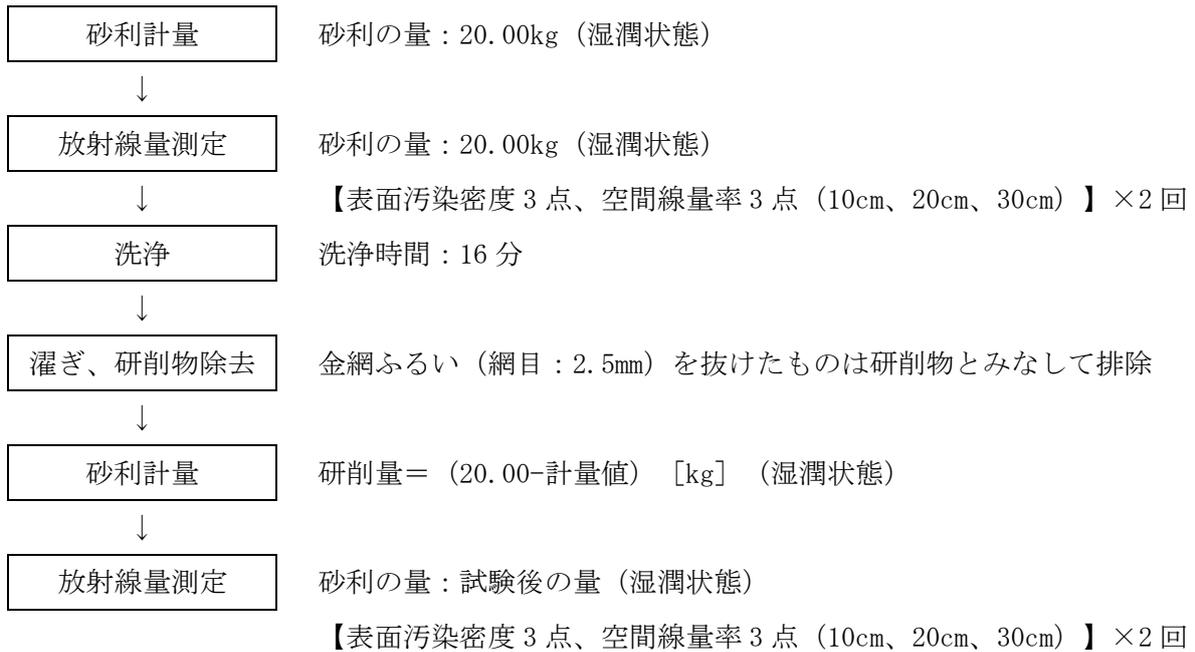


図 2.62 圧力・水量の違いにおける除染効果試験フロー

砂利を水で濡らしてから、試験前測定として砂利の重量及び放射線量を測定した。測定終了後、全体量が 20kg の砂利をポットミキサーに充填した。さらにポットミキサーからこぼれない程度に水を充填した。超高压水洗浄機のハンドガンセットし、砂利にハンドガンのノズルから噴出した水が十分に当たるように調整をした。

調整完了後、ポットミキサーを運転しながら 16 分間洗浄を行った。

洗浄終了後、ポットミキサーから砂利を取り出してきれいな水で濯ぎ、軽く水を切った状態で砂利全体の重量及び放射線量を測定した。

超高压水洗浄機の洗浄圧力及び水量の設定は、表 2.57 の条件にて実施した。

表 2.57 超高压水洗浄機の圧力・水量の設定

ノズル番号	写真	洗浄圧力		
		100MPa	200MPa	250MPa
#9		● (3.93)	● (5.56)	△ (6.22)
#11		—	△ (8.31)	—
#17		—	△ (19.85)	—

※1 ( ) 内の数値は、噴射ノズル、洗浄圧力から算出された水量[L/min]

- ※2 ● : これまでの試験 (2.4.3.1 項~2.4.3.4 項) で使用した設定  
 ※3 △ : 本試験で使用した設定

(4) 試験状況

試験状況を写真 2.23 に示す。



試験前計量



洗浄圧力調整 (250MPa)



除染試験状況



除染後計量

写真 2.23 圧力・水量の違いにおける試験状況

(5) 試験結果

a) 表面汚染密度

超高压水洗浄機の洗浄圧力、水量を変更して行った表面汚染密度の低減率を図 2.63、表 2.58 にそれぞれ示す。

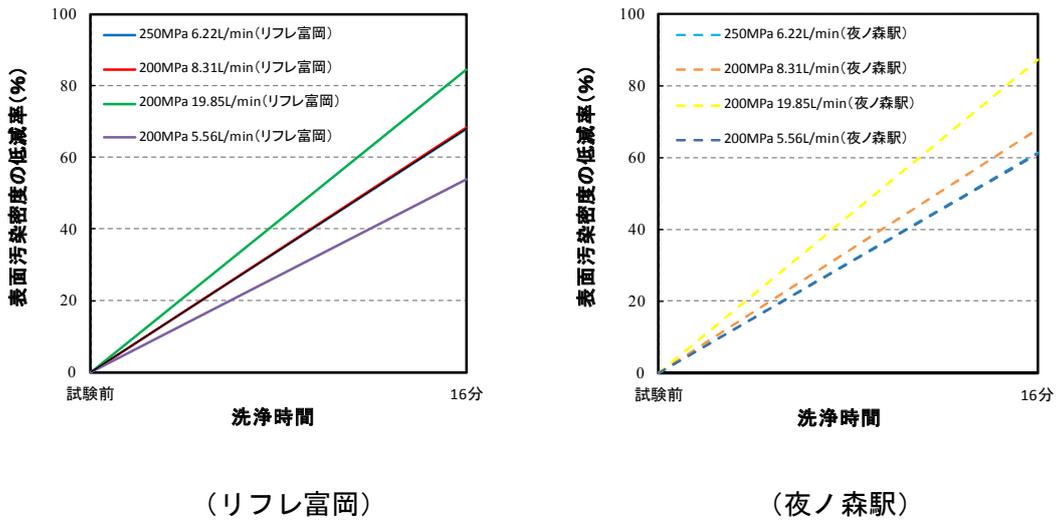


図 2. 63 洗浄圧力・水量の違いにおける表面汚染密度の低減率変化

表 2. 58 洗浄圧力・水量の違いにおける表面汚染密度の低減率の変化

試験条件	表面汚染密度 (cpm)			
	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部		夜ノ森駅	
	試験前	16分	試験前	16分
250MPa 6.22L/min	5067	1628	4337	1683
低減率 (%)	0	68	0	61
200MPa 8.31L/min	6754	2151	3583	1151
低減率 (%)	0	68	0	68
200MPa 19.85L/min	5062	780	2847	363
低減率 (%)	0	85	0	87
200MPa 5.56L/min	6595	3004	3586	1411
低減率 (%)	0	54	0	61

洗浄圧力、水量の設定を変更して行った試験の結果から、最も低減率が高い条件は圧力 200MPa、水量 19.85L/min の設定であった。これは砂利の種類及び放射線量測定条件に関係なく同じ傾向になった。

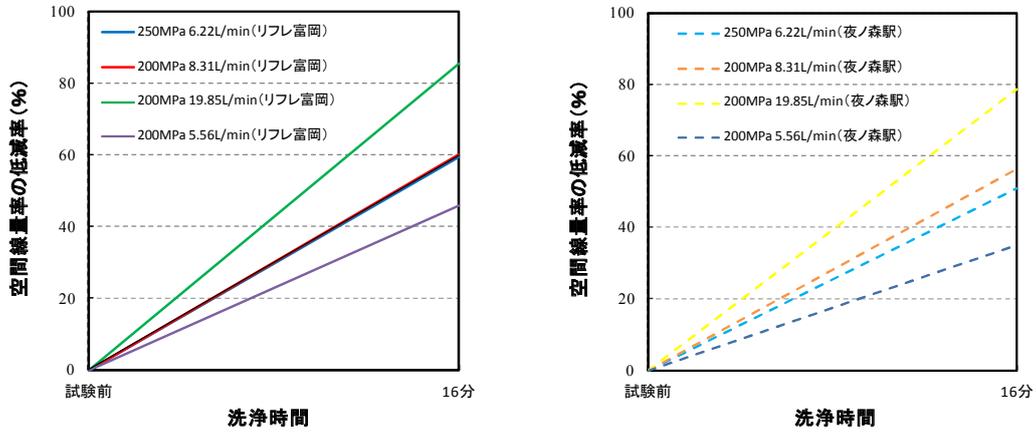
その他の洗浄条件ではリフレ富岡の砂利の場合、表面汚染密度、空間線量率とも 250 MPa 6.22L/min、及び 200MPa 8.31L/min の設定における低減率がほぼ同じになった。

また、夜ノ森駅の砂利の場合、表面汚染密度、空間線量率とも 250 MPa 6.22L/min、及び 200MPa 5.56L/min の設定における低減率がほぼ同じになった。

砂利の種類において低減率を比較した場合、リフレ富岡の砂利の方が高い低減率を示した。これは砂利の形状（リフレ富岡は楕円形、夜ノ森駅は立方または多角形）や石の材質の違いにより差が生じたものと推察される。

b) 空間線量率

超高圧水洗浄機の洗浄圧力、水量を変更して行った空間線量率の低減率を図 2.64～66、表 2.59～61 にそれぞれ示す。



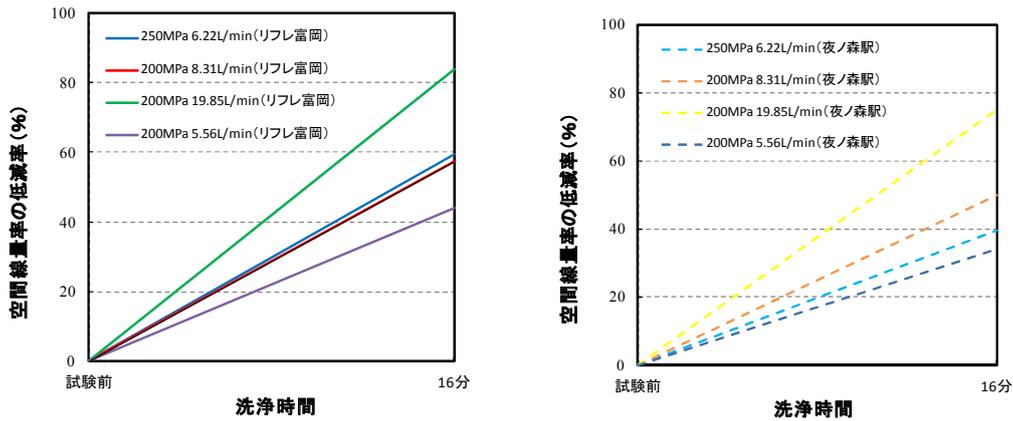
(リフレ富岡、測定高さ：10cm)

(夜ノ森駅、測定高さ：10cm)

図 2.64 洗浄圧力・水量の違いにおける空間線量率の低減率の変化

表 2.59 洗浄圧力・水量の違いにおける空間線量率の低減率 (測定高さ：10cm)

試験条件	空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )			
	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部		夜ノ森駅	
	試験前	16分	試験前	16分
250MPa 6.22L/min	2.58	1.05	1.24	0.61
低減率 (%)	0	59	0	51
200MPa 8.31L/min	3.63	1.45	0.94	0.41
低減率 (%)	0	60	0	56
200MPa 19.85L/min	2.95	0.43	0.84	0.18
低減率 (%)	0	85	0	79
200MPa 5.56L/min	3.74	2.02	0.86	0.56
低減率 (%)	0	46	0	35

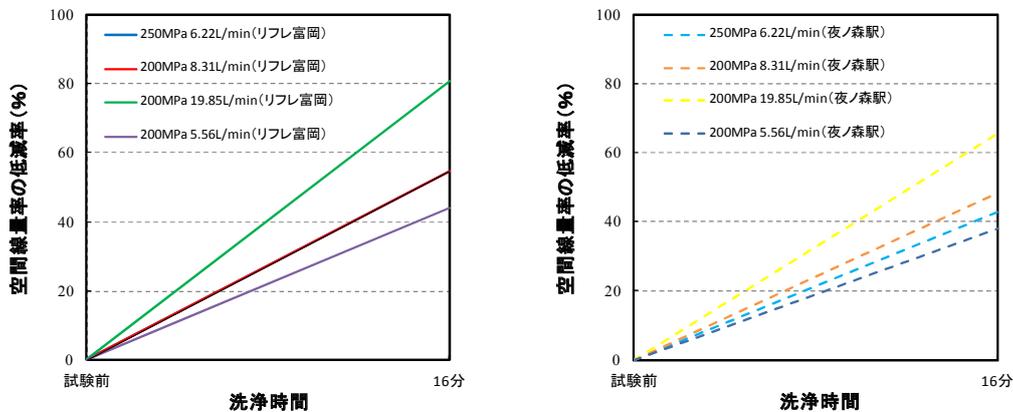


(リフレ富岡、測定高さ：20cm) (夜ノ森駅、測定高さ：20cm)

図 2.65 洗浄圧力・水量の違いにおける空間線量率の低減率の変化

表 2.60 洗浄圧力・水量の違いにおける空間線量率の低減率（測定高さ：20cm）

試験条件	空間線量率 (μSv/h)			
	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部		夜ノ森駅	
	試験前	16分	試験前	16分
250MPa 6.22L/min	1.26	0.51	0.53	0.32
低減率 (%)	0	60	0	40
200MPa 8.31L/min	1.71	0.73	0.44	0.22
低減率 (%)	0	57	0	50
200MPa 19.85L/min	1.36	0.22	0.4	0.1
低減率 (%)	0	84	0	75
200MPa 5.56L/min	1.80	1.00	0.44	0.29
低減率 (%)	0	44	0	34



(リフレ富岡、測定高さ：30cm) (夜ノ森駅、測定高さ：30cm)

図 2.66 洗浄圧力・水量の違いにおける空間線量率の低減率の変化

表 2.61 洗浄圧力・水量の違いにおける空間線量率の低減率（測定高さ：30cm）

試験条件	空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )			
	リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部		夜ノ森駅	
	試験前	16分	試験前	16分
250MPa 6.22L/min	0.73	0.33	0.35	0.2
低減率 (%)	0	55	0	43
200MPa 8.31L/min	0.99	0.45	0.29	0.15
低減率 (%)	0	55	0	48
200MPa 19.85L/min	0.78	0.15	0.26	0.09
低減率 (%)	0	81	0	65
200MPa 5.56L/min	1.05	0.59	0.29	0.18
低減率 (%)	0	44	0	38

洗浄圧力、水量の設定を変更して行った試験の結果から、最も低減率が高い条件は圧力 200MPa、水量 19.85L/min の設定であった。これは砂利の種類及び放射線量測定条件に関係なく同じ傾向になった。

その他の洗浄条件ではリフレ富岡の砂利の場合、表面汚染密度、空間線量率とも 250 MPa 6.22L/min、及び 200MPa 8.31L/min の設定における低減率がほぼ同じになった。

夜ノ森駅の砂利の場合、表面汚染密度、空間線量率とも 200MPa 8.31L/min の設定の方が 250 MPa 6.22L/min の設定の低減率より高い効果を示した。

また、砂利の種類において低減率を比較した場合、リフレ富岡の砂利の方が高い低減率を示した。これは砂利の形状（リフレ富岡は楕円形、夜ノ森駅は立方または多角形）や石の材質の違いにより差が生じたものと推察される。

### c) 研削率の測定結果

超高压水洗浄機の洗浄圧力、水量の設定を変更して行った試験の研削率の変化を図 2.67 及び表 2.62 に示す。

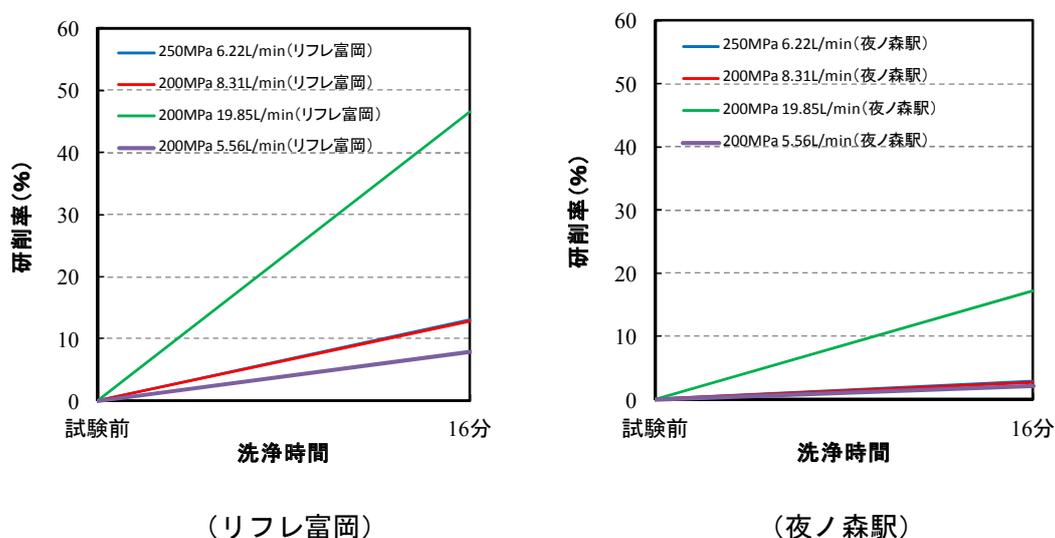


図 2.67 洗浄圧力・水量の違いにおける研削率

表 2.62 洗浄圧力・水量の違いにおける研削率

砂利の種類	試験条件	重量 (kg)		研削率 (%)
		試験前	16分	
リフレ富岡 宿泊棟 雨だれ部	250MPa 6.22L/min	20.00	17.38	13.1
	200MPa 8.31L/min	20.00	17.44	12.8
	200MPa 19.85L/min	20.00	10.71	46.5
	200MPa 5.56L/min	20.00	18.44	7.8
夜ノ森駅	250MPa 6.22L/min	20.00	19.39	3.1
	200MPa 8.31L/min	20.00	19.45	2.8
	200MPa 19.85L/min	20.00	16.56	17.2
	200MPa 5.56L/min	20.00	19.58	2.1

試験を行った砂利の研削率は砂利の種類に関わらず、250 MPa 6.22L/min の試験条件と 200MPa 8.31L/min の試験条件でほぼ同じ結果となった。この結果より、高い洗浄圧力で水量を少なくする、また、低い洗浄圧力で水量を多くする条件を設定することで、同等の研削効果が得られると考える。

また、さらに水量を多くした 200MPa 19.85L/min の設定の場合、どちらの砂利においても研削率は大幅に高くなった。

#### (6) 考察

試験結果より、超高压水洗浄機の圧力 200MPa、水量 19.85L/min の設定をした場合、リフレ富岡宿泊棟雨だれ部の表面汚染密度及び表面線量率ともに低減率が約 80% 台の結果が得られ、除染効果は非常に高い。

しかし、リフレ富岡宿泊棟雨だれ部の研削率が約 50% 近くあることから石の原形を保つことができない可能性がある。

本項では、一般の高圧水洗浄機には備わっていない超高压水洗浄機の特性を活かして、初期に設定した洗浄条件を基に、洗浄圧力及び水量を変化させた試験を行ったが、洗浄圧力または水量のどちらかを増加させると除染効果が高くなる傾向が確認できた。

しかし、水量を増加させると砂利の割れや飛び散りも多くなってしまい、研削量も高くなる傾向がある。

砂利が研削される要因として、洗浄機から噴射される水の衝撃力が考えられる。水の衝撃力は図 2.68 の式で求められる。本試験で設定した条件の衝撃力を表 2.63 に示す。

$$\text{衝撃力 [N]} = 0.7448 \times \text{水量 [L/min]} \times \sqrt{\text{洗浄圧力 [MPa]}}$$

図 2.68 水の衝撃力の計算式

表 2.63 砂利の除染試験での高圧・超高圧水洗浄機の条件

試験条件			
洗浄圧力 (MPa)	水量 (L/min)	衝撃力 (N)	備考
20	14.61	49	高圧水洗浄機
100	3.93	29	超高圧水洗浄機 (初期条件)
200	5.56	59	超高圧水洗浄機 (初期条件)
200	8.31	88	超高圧水洗浄機 (本項設定)
200	19.85	209	超高圧水洗浄機 (本項設定)
250	6.22	73	超高圧水洗浄機 (本項設定)

表 2.63 より、高圧水洗浄機の設定は衝撃力が約 50N ある。

超高圧水洗浄機 (200MPa) の初期条件は衝撃力が約 60N あり、高圧水洗浄機の衝撃力を上回る。また、本項の試験でリフレ富岡の砂利の重量が約半分になった設定 (洗浄圧力 200MPa、水量 19.85L/min) では、衝撃力が約 200N あり高圧水洗浄機の約 4 倍となる。この上記 3 種類の条件を比較した場合、研削率は衝撃力の順で増加する傾向が推察される。

そこで、衝撃力に対する低減率及び研削率の関係を本項の試験でリフレ富岡および夜ノ森駅の砂利の試験結果から検証した。

洗浄時間を 16 分で実施した時の衝撃力に対する表面汚染密度と空間線量率の低減率及び研削率の関係を図 2.69~71 及び表 2.64~65 に示す。

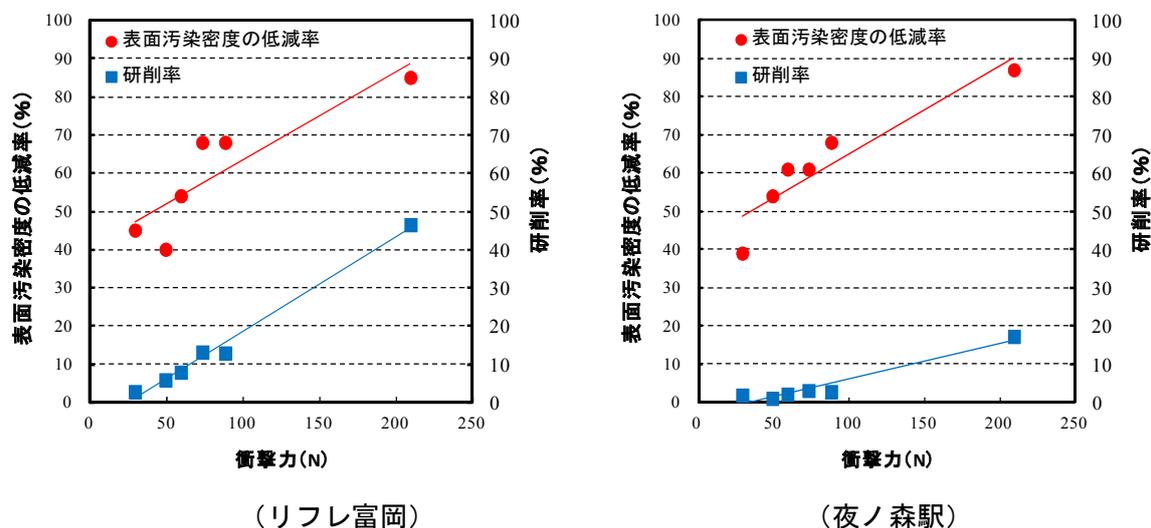
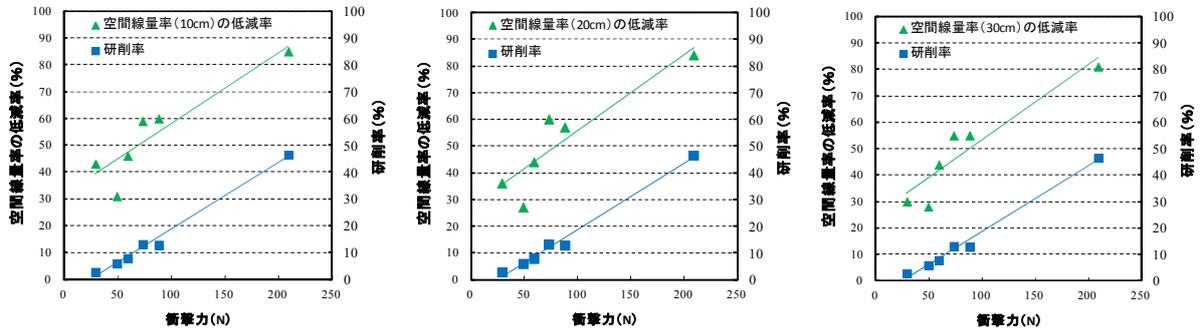


図 2.69 衝撃力と表面汚染密度の低減率・研削率との関係



(測定高さ : 10 cm)

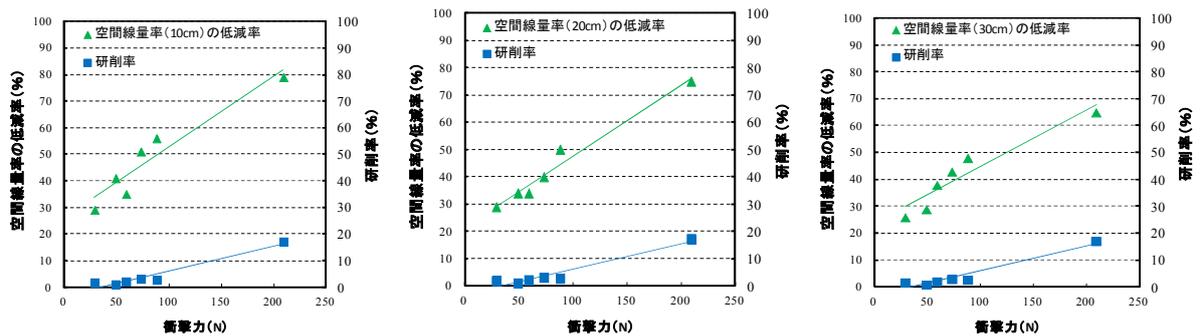
(測定高さ : 20 cm)

(測定高さ : 30 cm)

図 2.70 衝撃力と空間線量率の低減率・研削率との関係 (リフレ富岡)

表 2.64 衝撃力と低減率・研削率との関係 (リフレ富岡)

試験条件	衝撃力 (N)	低減率 (%)					研削率 (%)
		表面 汚染密度	空間線量率				
			10cm	20cm	30cm		
100MPa 3.93L/min	29	45	43	36	30	2.7	
20MPa 14.61L/min	49	40	31	27	28	5.9	
200MPa 5.56L/min	59	54	46	44	44	7.8	
250MPa 6.22L/min	73	68	59	60	55	13.1	
200MPa 8.31L/min	88	68	60	57	55	12.8	
200MPa 19.85L/min	209	85	85	84	81	46.5	



(測定高さ : 10 cm)

(測定高さ : 20 cm)

(測定高さ : 30 cm)

図 2.71 衝撃力と空間線量率の低減率・研削率との関係 (夜ノ森駅)

表 2.65 衝撃力と低減率・研削率との関係（夜ノ森駅）

試験条件	衝撃力 (N)	低減率 (%)					研削率 (%)
		表面 汚染密度	空間線量率				
			10cm	20cm	30cm		
100MPa 3.93L/min	29	39	29	29	26	1.8	
20MPa 14.61L/min	49	54	41	34	29	1.0	
200MPa 5.56L/min	59	61	35	34	38	2.1	
250MPa 6.22L/min	73	61	51	40	43	3.1	
200MPa 8.31L/min	88	68	56	50	48	2.8	
200MPa 19.85L/min	209	87	79	75	65	17.2	

図 2.69～71 及び表 2.64～65 より、リフレ富岡及び夜ノ森駅の砂利が衝撃力の増加とともに低減率および研削率が増加しており、高圧及び超高压水洗浄機の噴射ノズルから出る水の衝撃力が除染効果に繋がることが分かった。

つまり、除染効果＝洗浄水の衝撃力×洗浄時間と言える。

しかし、本試験の 2.4.3.2～2.4.3.5 項の立体的な洗浄方法において、ポットミキサーと高圧または超高压水洗浄機を組み合わせた洗浄方法では、洗浄時に砂利の割れが発生することを確認した。特に、高圧水洗浄機の設定（洗浄圧力 20MPa、水量 14.61L/min）が超高压水洗浄機（100MPa）の設定（洗浄圧力 100MPa、水量 3.93L/min）よりも研削率が高くなったケースがあった。

そこで、表 2.64～65 から衝撃力を検証すると、高圧水洗浄機が 49N、超高压水洗浄機が 29N となっており高圧水洗浄機の方が大きい。そのため、高圧洗浄機は水圧で砂利の表面を削るよりも水量で砂利を押しつける力が大きく、砂利を吹き飛ばし、砂利同士またはポットミキサーの容器内面と衝突して割れたと考える。

研削量はノズル形状等によっても左右されると考えられるが、砂利の品質（形状）を保つために可能な限り破砕量を減らし、除染効果を高める洗浄を行うためには、水量を抑え洗浄圧力を上げることが重要だと推察する。

大きな衝撃力で洗浄する場合、砂利の飛散、衝撃における破砕等の対策を行う工夫が必要である。例えば、ポットミキサーと超高压水洗浄機（200MPa 19.85L/min の設定）を組み合わせた方法では、砂利の飛散が非常に大きくミキサーの外にまで飛び出してしまう状態になった。このため写真 2.24 のようにポットミキサーの開口部に金網で蓋をする工夫をした。



試験状況全景



金網の設置

写真 2.24 砂利の飛散対策の工夫

また、本試験では、高圧または超高压水洗浄機のノズル先端をポットミキサーの攪拌による、砂利が水面から若干上の位置に持ち上がった所に合わせて洗浄を行った。

しかし、ノズルから噴射された水の力が強く、対象となる石が衝撃により飛散し、石同士またはミキサー内壁への衝突による破砕が発生した。

このため、ポットミキサー内の洗浄位置や噴射ノズルの向き等を工夫することにより、砂利の飛散、衝撃による破砕の低減対策を行うことが必要である。

砂利が完全に固定している位置では立体的な洗浄は難しいが、砂利の動きが少ないポットミキサーの下面の位置へノズルの向きを合わせて洗浄水を当ててやること、また、ポットミキサー内部から水抜きができるような工夫を施し、ポットミキサーに水が溜まらないように常時排水しながら、砂利を押しえつける方向から噴射ノズルを当てることで石の破砕を抑え、品質を保ちながら効果的な除染を行える可能性がある。

### 3. 放射性物質の分布確認

異なる砂利の除染効果を検証するため、イメージングプレート（以下 IP と表記）を使用して砂利に付着した放射性物質の状態、及び除染前後の効果を確認した。

砂利の表面は、球形や多角形であることが多く平坦ではないため、IP シートとの非接触部分の解析が困難となる。そのため砂利サンプルをカットした断面での IP 試験を主に行うこととし、断面サンプルが作製できないサンプルは表面による検証を実施した。

また、非汚染の砂利の自然放射線量を確認し、除染後の砂利と比較を行うため、放射性物質の沈着の可能性が少ないリフレ富岡宿泊棟ベランダ下、及び常磐線の復旧で新規にバラストを敷設した場所から、検体となる砂利を採取して自然放射線量の測定を行った。

#### 3.1 除染前後の分布状態

##### 3.1.1 確認方法

IP 試験の除染前のサンプルは、2.1 節「砂利の種類」で採ったものを使用した。除染後のサンプルは、表 3.1 の条件にて試験したものを使用した。

表 3.1 IP 試験条件

サンプル種類	試験 No.	試験条件	試験時間
リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	CR-2-1	ポットミキサー＋超高压水洗浄機（200MPa）	16 分
富岡町役場 バス車庫屋上	B-1	ポットミキサー＋高压水洗浄機	8 分
民家	M-5	モルタルミキサー	60 分
夜ノ森駅	CY-2-1	ポットミキサー＋超高压水洗浄機（200MPa）	16 分
太田陸前浜 街道踏切	CF-2-1	ポットミキサー＋超高压水洗浄機（200MPa）	16 分

##### 3.1.2 樹脂固着作業

IP 測定に使用する除染前後の各種の砂利サンプルを選定し、石表面（上面と下面）の放射線量（表面汚染密度）を GM 計数管式サーベイメータ（TGS-146B）で測定し、放射線量が高い方を上面、低い方を下面とした。

砂利の断面測定用サンプルを作製するため、プラスチック製型枠容器内に入れた石の周囲に FRP 樹脂剤を流し込み、一定温度下で 1～2 日養生した。

養生完了後は型枠容器から取り外し、さらに 1～2 日養生した。

作業状況を写真 3.1 に示す。



使用樹脂剤 (FRP 樹脂)



主剤



硬化剤添加



混合・攪拌状況



型枠内充填状況



充填完了・養生

写真 3.1 樹脂固着作業状況

### 3.1.3 IP サンプルのカット作業

FRP 樹脂による石周囲の固着が完了後、高速カッターを使用して IP サンプルの分割作業を行った。石 1 個に対して 1～2 箇所をカットした。

作業状況を写真 3.2 に示す。



写真 3.2 IP サンプルのカット作業状況

### 3.1.4 IP シートへの露光状況と養生

IP シートを消去機に入れて 15～20 分間、前回の測定データの記録を消去した。その後、IP シートをポリ袋（汚染防止）に入れて鉛ブロックで遮蔽されたボックスの中へシートをセットした。測定したいサンプルの面を IP シートに接触させるように設置し、暗幕等で光を遮断して 2～6 日間静置養生を行った。

なお、試験サンプルは露光時間を同じにするため、除染前後の同種の石を同じ IP シート上にセットして比較を行った。

設置状況を写真 3.3 に示す。



写真 3.3 IP シートと測定サンプルの設置状況

### 3.1.5 画像解析装置による IP シートデータのスキャン・解析

露光が完了した IP シートを、なるべく光が当たらないように測定サンプルを取り外し、ポリエチレン袋から出して画像処理装置に IP シートをセットした。

パソコン操作により IP シートの画像情報をスキャンして各種石の放射性物質の付着状態を確認した。

スキャン状況とサンプルの画像状態を写真 3.4 に示す。

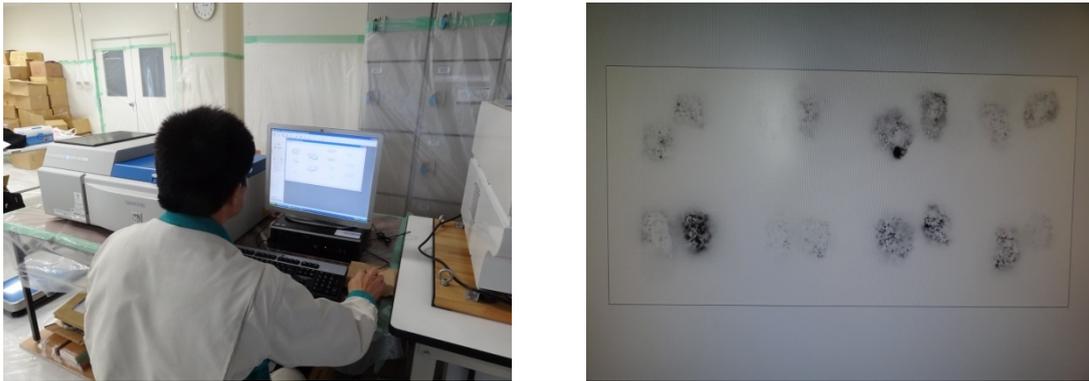


写真 3.4 画像解析装置によるスキャン状況とサンプルの画像状態

### 3.1.6 砂利断面の分布状態

リフレ富岡、夜ノ森駅及び太田陸前浜街道踏切の砂利については、石をカットして断面状態の検証を行った。

それぞれの石の IP 試験結果を表 3.2～4 に示す。

表 3.2 リフレ富岡 IP 試験結果

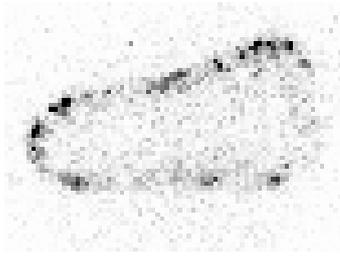
		除染前	除染後
		写真	
上：可視写真			
下：IP写真			
表面 汚染 密度 [cpm]	上面	2000	858
	下面	1400	565

表 3.3 夜ノ森駅 IP 試験結果

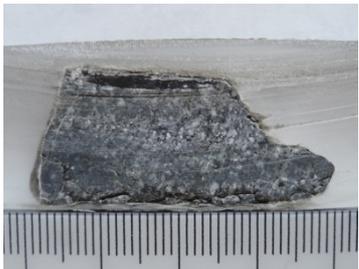
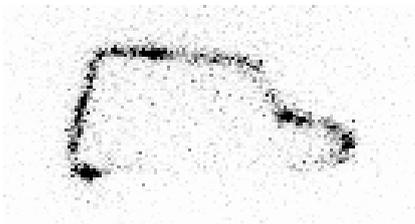
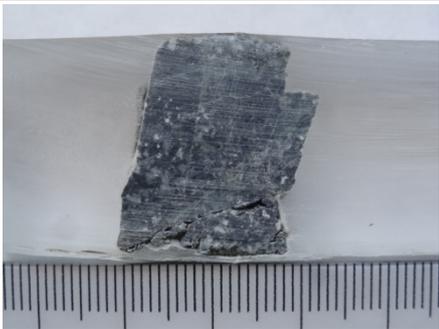
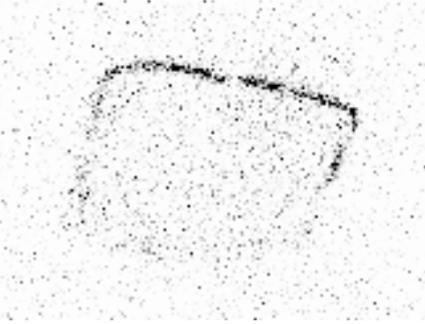
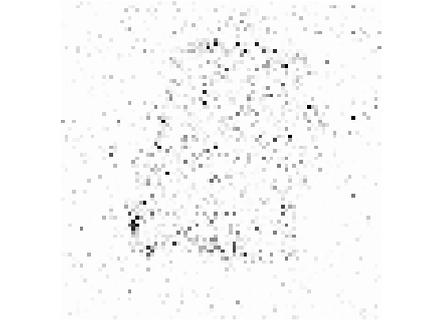
		除染前	除染後
		写真	
上：可視写真			
下：IP写真			
表面 汚染 密度 [cpm]	上面	2400	322
	下面	1340	307

表 3.4 太田陸前浜街道踏切 IP 試験結果

		除染前	除染後
写真	上：可視写真		
	下：IP写真		
表面 汚染 密度 [cpm]	上面	483	233
	下面	239	192

### 3.1.7 砂利表面の分布状態

富岡町役場バス車庫屋上及び民家から採取した砂利については、石の粒径が 5 mm から大きいもので 2 cm 弱と非常に小さいため、高速カッターにより断面サンプルを作製することは困難であった。そのため、石表面に付着した放射性物質の変化について IP で検証を行った。それぞれの石の IP 試験結果を表 3.5～6 に示す。

表 3.5 富岡町役場バス車庫屋上 IP 試験結果

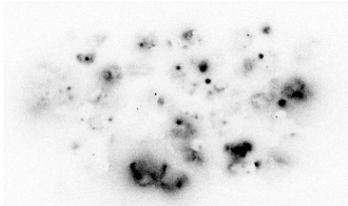
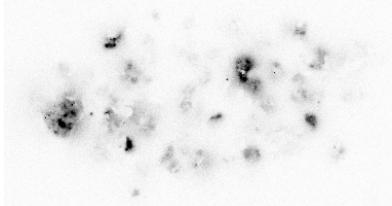
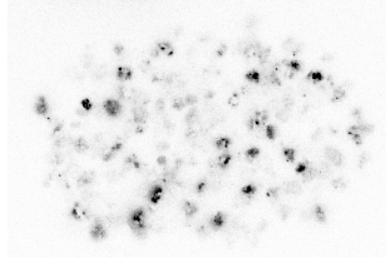
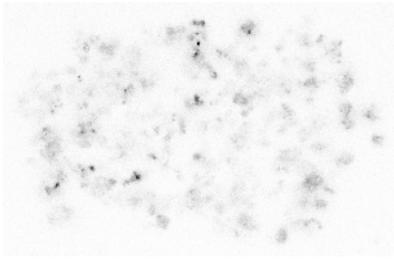
		除染前	除染後
写真	上：可視写真		
	下：IP写真		

表 3.6 民家 IP 試験結果

	除染前	除染後
写真		
上: 可視写真 下: IP 写真		

### 3.1.8 考察

それぞれの石において、除染前の IP 写真では放射性物質の付着した部分が黒くはっきりした輪郭が写し出された。IP 写真の黒い部分は表面全面に近いものもあるが、一部分放射性物質が付着していないような部分もあり、その面は福島第一原子力発電所の事故当時、飛散した放射性物質が付着せず、かつこれまでの経時変化で放射性物質が移動しなかった部分であると考えられる。また、写真から付着した放射性物質は石全面のうち半分の面が付着しているものが多いことから、より立体的な除染を行うことが重要であることが分かる。

除染後の石の表面については、比較的平坦な面は洗浄により除去され放射性物質による濃い画像は少ない（表 3.3 夜ノ森駅除染後）。しかし、凹凸部分や角部においては洗浄時に取りきれていない部分もあることが確認された（表 3.2 リフレ富岡除染後）。

また、夜ノ森駅や太田陸前浜街道踏切のような砂利については、石の輪郭（写真の白い面）がはっきりしていることから、砂利の窪み部分に付着した部分や洗浄しきれなかった部分に存在していると考えられる。富岡町役場バス車庫屋上の砂利、及び民家の砂利の IP 試験結果から、除染後の IP 写真は除染前に比べて色の濃い部分が少なく、画像の濃淡のコントラストが不明瞭となる傾向が得られた。これより、砂利表面に付着した放射性物質は、各工法の洗浄により除去されているが、除染後の IP 写真で濃い（放射能濃度が高い）部分が残っていることから、洗浄しても除去できなかった部分もあることが分かった。

全体の IP 試験結果から、石の表面が一様に汚染しておらず、また個々の砂利によっても放射性物質（セシウム）の付着が多いものと少ないものがあることが分かった。これは、放射線量測定時のバラツキがあったことと整合する。

### 3.2 砂利の自然放射線量測定

「2.4.3.5 圧力と水量の違いにおける除染効果の確認」の結果から、同じ試験条件であればリフレ富岡宿泊棟棟雨だれ部と夜ノ森駅の砂利の表面汚染密度の低減率は、ほぼ同じであった(表 2.58 洗浄圧力・水量の違いにおける表面汚染密度の低減率の変化)、一方、研削率の結果を見るとリフレ富岡宿泊棟雨だれ部の砂利が夜ノ森駅の砂利に比べ 3~4 倍多く研削されている(表 2.62 洗浄圧力・水量の違いにおける研削率)。研削率が大きい割に表面汚染密度の低減率が上がらなかった原因を検討した。

原因としては放射性物質が表面に付着し、洗浄作業後、砂利の窪み部分に付着した部分や洗浄しきれなかった部分に存在している。または砂利自体がもつ自然放射線量が高いことが考えられた。

そこで砂利本来が持つ自然放射線量を確認するため、放射性物質の沈着が少ない箇所を調査・選定し、検体となる砂利を採取して自然放射線量の測定を行った。

併せて、東日本旅客鉄道(株)の了解を得て、JR常磐線の新たに敷き直した非汚染バラストも同様に測定を行い、夜ノ森駅及び太田陸前浜街道踏切の砂利(バラスト)と比較評価するための自然放射線量の測定を行った。

#### 3.2.1 砂利の種類

砂利は表 3.7 の場所から採取したものを使用した。リフレ富岡の砂利は放射性物質の沈着の可能性が少ない場所を調査し、建物のベランダ下を選定した。

表 3.7 自然放射線測定用砂利の種類

採取場所	採取場所写真	砂利写真
リフレ富岡 宿泊棟ベランダ下 (花崗岩)		
JR常磐線竜田駅 北踏切 (バラスト)		

#### 3.2.2 試験方法

リフレ富岡において、放射性物質の沈着が少ない場所を調査し、建物軒下に敷設された砂利を必要量(20kg程度)採取した。JR常磐線竜田駅北踏切にあるバラストは、除染後敷き直した石であることから、表面部分の砂利を必要量(20kg程度)採取した。

採取後、富岡町役場バス車庫に移動して、放射線量測定を行った。  
放射線量測定は、砂利の乾燥状態と湿潤状態の2種類の測定を行った。

### 3.2.3 放射線量測定方法

2.4.3.3 項の測定方法と同様に行った。但し、砂利の量は20kgで測定を行った。また、表面汚染密度と空間線量率の測定高さでバックグラウンドを1点測定した。

### 3.2.4 試験結果

リフレ富岡（花崗岩）、JR常磐線竜田駅北踏切（バラスト）及びバックグラウンドの測定結果を表3.8～10に示す。

表 3.8 バックグラウンド測定結果

測定方法	測定高さ	バックグラウンド値
表面汚染密度[cpm]	1cm	35
空間線量率 [ $\mu$ Sv/h]	10cm	0.02
	20cm	0.04
	30cm	0.06

表 3.9 リフレ富岡（花崗岩）の自然放射線量測定結果

測定方法	測定高さ	乾燥時		湿潤時	
		Gross 値	Net 値	Gross 値	Net 値
表面汚染密度[cpm]	1cm	175	140	177	142
空間線量率 [ $\mu$ Sv/h]	10cm	0.07	0.05	0.07	0.05
	20cm	0.05	0.01	0.06	0.02
	30cm	0.07	0.01	0.07	0.01

表 3.10 JR常磐線竜田駅北踏切（バラスト）の自然放射線量測定結果

測定方法	測定高さ	乾燥時		湿潤時	
		Gross 値	Net 値	Gross 値	Net 値
表面汚染密度[cpm]	1cm	94	59	95	60
空間線量率 [ $\mu$ Sv/h]	10cm	0.04	0.02	0.04	0.02
	20cm	0.04	0	0.04	0
	30cm	0.07	0.01	0.06	0

### 3.2.5 考察

試験結果から、リフレ富岡の花崗岩及びJR常磐線竜田駅北踏切のバラストが持つ自然放射線量は低かった。このため砂利の除染試験の除染後の放射線量が下がりきれなかった原因としては、洗浄作業後、砂利の窪み部分に付着した部分や洗浄しきれなかった部分に存在していることが考えられる。

## 4. 結果と考察

### 4.1 砂利、使用機器及び除染方法のまとめ

#### 4.1.1 試験に用いた砂利の特徴と物理的効果

本試験では3種類6箇所の砂利を用いて試験を行った。試験データと石の相互関係を確認するために、先行して使用した各砂利の特徴を表4.1に示す。また、試験に使用した機器の物理的効果を評価する。使用機器の物理的効果を表4.2に示す。

表4.1 使用した各砂利の特徴について

No	砂利の種類	圧縮強度※1	採取場所	形状
1	花崗岩	約1,500kgf/cm <sup>2</sup>	富岡町 リフレ富岡宿泊棟雨だれ部	表層の凹凸が 大きい
			富岡町リフレ富岡屋上※2	
2	安山岩	約1,000kgf/cm <sup>2</sup>	JR常磐線夜ノ森駅	比較的フラット サイズはバラバラ
			JR常磐線太田陸前浜街道踏切	
3	砂岩	約500kgf/cm <sup>2</sup>	富岡町リフレ富岡屋上※2	サイズはバラバラ
			富岡町役場車庫	サイズはバラバラ
			富岡町民家庭	サイズは概ね一緒
4	コンクリート	約150~ 250kgf/cm <sup>2</sup>	参考	—

※1 小原二郎「建築内装技術ハンドブック」朝倉書店、1984.<sup>3)</sup>

※2 花崗岩と砂岩の混在

表4.1より、各石の種類の圧縮強度をみると、花崗岩1,500kgf/cm<sup>2</sup> (147MPa) (リフレ富岡宿泊棟雨だれ部)、安山岩1,000kgf/cm<sup>2</sup> (98MPa) (バラスト)、砂岩500kgf/cm<sup>2</sup> (49MPa) (富岡町リフレ富岡屋上、富岡町役場バス車庫屋上および民家) に対し、コンクリート250kgf/cm<sup>2</sup> (24.5MPa) と比較すると、富岡町役場車庫屋上および民家の石でも非常に硬い材質であることが確認できる。

それぞれの石の除染効果を高めるには石の表層に付着した放射性物質を確実に剥離するため、石を薄く研削する必要があると考えられる。

本試験の使用機器に石表層を研削する能力が実際にあるのか、機器自体の研削能力の物理的な効果の検討を行った。

対象物を破壊(研削)するためには、機器の「速度×重量×硬度=研削力」(物の破壊力や衝突・衝撃力(交通事故やゴルフの力学等)で類似した関係式を参考)の相乗効果が必要であると考えられる。

例として、圧縮強度1,500kgf/cm<sup>2</sup> (147MPa)の石に対し10kgf/cm<sup>2</sup> (0.98MPa)の餅を叩きつけても傷をつけることはできない。石の表層を研削するには石の圧縮強度を上回るエネルギーを衝突させなければならないと考える。

本試験で使用した機器(超音波洗浄機、研磨機、モルタルミキサー、ポットミキサー、高圧水洗浄機、超高圧水洗浄機、ウェットブラスト)の機器特性から共通の研削能力の確認を行った。使用機器から発生するエネルギーは以下の①~③に分けられる。

- ① 圧力: 高圧水洗浄機(0~20MPa)、超高圧水洗浄機(0~280MPa)、ウェットブラスト(0.4MPa)

- ② 吐出量：高圧、超高圧水洗浄機共にノズル径の変更により最小～最大吐出量まで変更可能。
- ③ 混入材：ウェットブラストは混入マテリアル（本試験ではアルミナ）の変更可能。モルタルミキサー、ポットミキサーは投入する石自体を混入材とする。

①～③の変更可能な発生エネルギーを基に物理的効果「速度×重量×硬度＝研削力」に当てはめると表 4.2 のように代入できる。

表 4.2 使用機器の物理的効果

	使用機器	仕様	要素	速度	重量	硬度
キ シ ャ ヨ ビ ン テ	超音波 洗浄機	発振：28kHz、38kHz PZT 自励発振 槽容量：20.4L	①圧力	—	—	—
			②吐出量	—	—	—
			③混入材	—	—	—
摩 砕	研磨機	回転数：MAX250rpm 投入部容量：30L 混合量：20L	①圧力	—	—	—
			②吐出量	—	—	—
			③混入材	△	△	△
	モルタル ミキサー	回転数：150rpm 投入部容量：180L 混合量：120L	①圧力	—	—	—
			②吐出量	—	—	—
			③混入材	△	△	△
ポット ミキサー	回転数：28rpm 投入部容量：50L 混合量：30L	①圧力	—	—	—	
		②吐出量	—	—	—	
		③混入材	△	△	△	
ブ ラ ス ト	ウェット ブラスト	空気圧力：0.4MPa 研削材：アルミナ多角形	①圧力	△	△	△
			②吐出量	—	△	—
			③混入材	—	△	◎
	高圧水 洗浄機	圧力：20MPa 水量：15L/min	①圧力	○	△	○
			②吐出量	—	◎	—
			③混入材	—	—	—
	超高圧水 洗浄機	最大圧力：280MPa 最大水量：22.7L/min	①圧力	◎	○	◎
			②吐出量	—	◎	—
			③混入材	—	—	—

凡例 ◎：影響が大きい、○：影響がある、△：影響が小さい、—：影響がない。

※ ポットミキサーは、砂利を攪拌するために使用

### ① 圧力

圧力の上昇と共に流速（速度）が上昇する（トリチェリの定理）。圧力の上昇に伴いノズル吐出量が増加するため、対象物へ与える重量が増加する（ベルヌーイの定理）。圧力の上昇に伴い流速が上がるため、水が石に衝突した際の反作用も増大する。水の衝突による研削効果は、高速で衝突する水の反

作用を利用したものと推察できる。

② 吐出量

ノズルのサイズを変更することで同じ圧力時における吐出量を変更することができる。最大吐出量の大きいポンプほど、より大きいノズルで昇圧できる。水量が多いほど対象物へ与える重量が増加するものと推察できる。

③ 混入材

ウエットブラストはアルミナを混入させる。アルミナは 20,000kgf/cm<sup>2</sup> (1961MPa) を超える非常に強い圧縮強度を備えており、対象物に与える硬度による研削効果は高いものと推察する。

また、モルタルミキサー、ポットミキサーは石同士の擦り合わせを主とした研削効果がある。例えるなら縦型洗濯機 (モルタルミキサー) とドラム式洗濯機 (ポットミキサー) の違いと類似している。

モルタルミキサーは攪拌羽根の回転力を利用して水流を発生させて石を擦り合わせているため、衝突し合う石の大きさにより速度、重量、硬度が変動する。さらに水流を発生させる攪拌羽根が石に直接衝撃を与えることで研削効果を生じさせると推察できる。

ポットミキサーはドラムの回転によって生じる石の落下運動による衝突と、石同士の擦り合わせによる研削効果があると推察される。

4.1.2 各試験結果の評価と考察

砂利を除染するため、超音波洗浄機、研磨機、モルタルミキサー、ウエットブラスト、高圧水洗浄機、超高圧水洗浄機の 6 種類の機器を用いて、異なる材質、形状及び汚染の程度が違う 6 種類の砂利を試験した。これらの機器を使用して除染を行った結果を表 4.3 にまとめるとともに各機器の除染評価と考察を記す。

表 4.3 砂利別除染方法の適用性総括表

砂利採取場所	粒径 (形状)	除染方法					
		キャビテーション	摩砕		ブラスト		
		超音波 洗浄機	研磨機	モルタル ミキサー	ウエッ トブラ スト	高圧水	超 高圧水
A 富岡町民家 庭	約数 mm (多角形)	△	○	○	×	×	×
		※1			飛散	飛散	飛散
B 富岡町役場車庫	約数 mm~2cm (楕円形)	△	○	△	×	×	×
		※1		※3	飛散	飛散	飛散
C 富岡町リフレ富岡 宿泊棟雨だれ部	約 2~4cm (楕円形)	△	○	×	△	○	○
		※1		噛み込み	※4		
D 富岡町 リフレ富岡屋上	約 2~4cm (楕円形)	△	○	×	△	○	○
		※1		噛み込み	※4		
E JR 常磐線夜ノ森駅	約 4~8cm (多角形)	△	△	×	△	○	○
		※1	※2	噛み込み	※4		
F JR 常磐線 太田陸前浜街道踏切	約 4~8cm (多角形)	△	△	×	△	○	○
		※1	※2	噛み込み	※4		
※1 除染効果小、処理時間的にも大量処理難		※2 物理的に攪拌難					
※3 粒径が約 1cm 以上だと噛み込み 大量処理難		※4 研削物の二次廃棄物発生のため					

### 1) 超音波洗浄機を使用した場合

小さな気泡（キャビテーション）による衝撃波がどれ位の除染効果があるか、どれ位の時間が必要か、また、除染水の性状で違いがあるか確認した。試験はリフレ富岡の砂利（花崗岩）に対して、水、クエン酸（取扱が容易な酸）及び洗浄剤（スケール溶解性）を使用して実施したが、炭酸塩鉱物が少ない花崗岩主体の砂利には、除染水の性状別による低減率に違いはほとんどなかった。

キャビテーションで砂利の表面を削る効果があることは分かったが、除染効果が小さく実用的ではない。超音波洗浄方式は、形状が複雑な対象物を除染する必要がある場合に適していると思われる。

### 2) 研磨機を使用した場合

砂利どうしが擦れ合い研削するには、連続して速く動かす必要がある。試験に用いた研磨機では、120rpm 以上必要であるとメーカーからの指示があり砂利が割れないよう 150rpm 及び 120rpm で行った。

試験の結果、砂利を 20 分間研削した場合は研削率の平均が約 4%、研削時間を 60 分間にした場合は研削率の平均が約 10%、この時の表面線量率の低減率の平均が約 60%（最大 66%）であった。研削時間の長さの割には低減率が比例して高くなく、イメージングプレートを用いて測定したところ、放射性セシウムは砂利表面の黒い部分（黒雲母）に多く付着していることが確認でき（表 3.2 リフレ富岡 IP 試験結果）、また、洗浄作業後、砂利の窪み部分に付着した部分や洗浄しきれなかった部分に存在していることが考えられる。

石が研削していく過程については、下記モルタルミキサーを使用した場合に記す。

### 3) モルタルミキサーを使用した場合

本試験にて使用した砂利において、民家及び富岡町役場バス車庫屋上との石の大きさの違いで洗浄の可否に違いが得られた。

石の大きさ、形状についてはほぼ同じものもあるが、富岡町役場バス車庫屋上の砂利は一部数cmの大きさの石も含まれており、砂利全体の石の大きさが均一ではない。そのため、比較的大きな石が攪拌羽根とモルタルミキサー容器との間に挟まり、ミキサー側面の壁との間に引っ掛かる状態が生じてモルタルミキサーが動かなくなった。

また、この大きさ以上の砂利も同様に攪拌羽根に挟まり、モルタルミキサーの攪拌ができなかった。

モルタルミキサーの石同士の擦り合わせによる除染は、2.4.1.3 項の試験結果より、表層の汚れを洗い流した後、ある一定の時間（本試験では洗浄時間 10 分）をピークに、それ以降洗浄し続けても比例した除染効果が得られにくいことが明白である。

これは多面体である石が回転、摩擦、角部研削等のサイクルを繰り返されることで、最終的に球体に近づいてきている状態と推測できる。

例を挙げると、ミキサーに投入された石全てを正 6 面体と仮定し、回転研削を繰り返した場合、図 4.1 のように角部（突起部）を中心に研削され、計り知れない時間をかければ最終的に球体に近づくと予測できる。

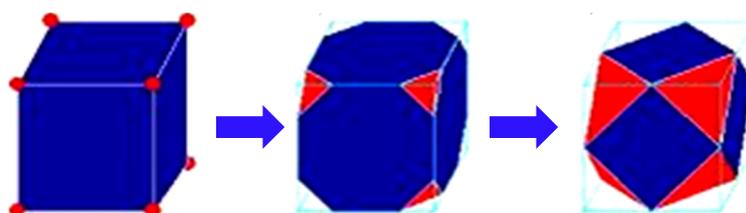


図 4.1 石の研削サイクル

これを除染に置き換えると、図 4.1 の青色が汚染状態だと仮定できる。

球体に近づく過程で 12 面体まで研削されても、元の 6 面体の面に当たる青色部分は除染できていないことがわかる。

実際は青色の面においても多少の研削効果はあると推測できるが、試験結果の研削量を確認すると、時間経過と共に研削効果が得られているにもかかわらず、放射線量が低下しない状態がわかる。その結果、石の擦り合わせによる除染で全面を仕上げるには研削量を増やさなければ除染効果があらわれないと仮定できるため、非常にロスが大きい工法と推察できる。

この仮定を試験結果に当てはめると、試験開始約 10 分で石の角部（突起部）の研削が進行し、角が丸くなったことで石の摩擦効果が低下し、さらに角部の研削は進むものの、石平面の研削は進んでいない状態であると考えられる。

また、機械的欠点として、モルタルミキサーの場合は攪拌羽根の打撃や容器との挟まれに等により、石の破壊（割れ）や機器停止も発生する。

モルタルミキサー本来の用途である石をかき混ぜるという性能では優れた機械であると考えられるため、その他の力を複合した使用方法が効果的と考えられる。

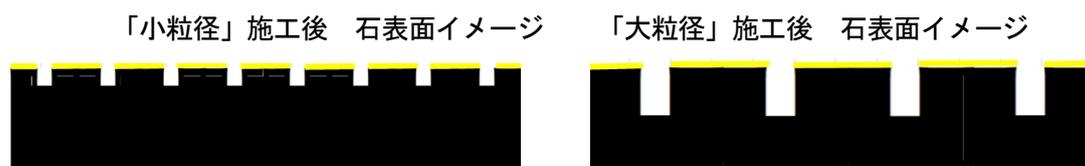
#### 4) ウェットブラストを使用した場合

本試験で使用したウェットブラストは、球形（φ800mm）の作業室内にてハンドガンを用いて洗浄する装置である。洗浄する対象物が作業室内で自在に動かせるものであれば、ハンドガンの自由度も組み合わせて広範囲に洗浄することが可能である。

今回の砂利試験では、対象物となる砂利をテストピース板で挟み、石を固定して洗浄を行った。テストピース板は作業エリア中央部に置き、上からハンドガンを用いて洗浄を行った。

ウェットブラストは水及び研削材を圧縮空気で吹き付けて対象物を洗浄する。ガンの位置が対象物から離れても研削材の効果により洗浄が可能であることから、高圧や超高圧水洗浄と比較して高い効率にて洗浄作業ができる。そのため、試験で使用した砂利の種類、大きさに関係なく均一に洗浄ができたため、どの砂利に対しても低減率の効果が得られた。

同じ材質であれば、粒径が大きいほど重量が大きくなる。粒子サイズは小粒径が 212~300 $\mu\text{m}$ 、大粒径が 300~600 $\mu\text{m}$  であることからアルミナが球体と仮定すると、体積が約 4 倍であることから研削力が約 4 倍になると考えられるが、「粒子数/時間」が低下したため、汚染密度が下がらなかったと推察できる。除染後の石施工面イメージを図 4.2 に示す。



(石：黒、汚染状態：黄色)

図 4.2 ウェットブラストの施工イメージ

汚染物質の付着状況は表層のごく薄い部分であり、「面積あたりに衝突させる粒子数」が重要になると考えられる。より短時間で多くの粒子を衝突させることができる小粒径が有効であるが、さらに小さい粒径については「速度×重量×硬度＝研削力」でいうところの、重量が少なすぎることで研削力が足りなくなり、逆に表面汚染密度の減少率が低下する恐れもあるので注意が必要であると考えられる。

ウェットブラストの欠点としては、高額なアルミナを利用しなければならないため、リサイクルシステムの併用が必須であるということである。仮にリサイクルシステムを構築しないで施工すると莫大な消耗品費が発生する。またリサイクルできない場合、放射性物質を含む廃棄物の量を増加させる。砂利の除染により発生する廃棄物を考慮した場合、ミキサー、高圧・超高压水洗浄では除染水と研削した土壌の 2 種類に対し、ウェットブラストでは、除染水と研削した土壌及び研削材の 3 種類となり廃棄物が増加する。

以上のことからウェットブラストの使用にあたっては材料の硬度、粒径、また混入材料のリサイクルシステムに特に配慮したシステム開発が重要になると考えられ、これらの問題を解決すれば、砂利の除染に対してより高い効果がある工法の一つとして利用することが可能である。

## 5) 高圧水及び超高压水洗浄機を使用した場合

### ・ 高圧水洗浄機及び超高压水洗浄機の共通事項

水を投射する高圧・超高压水洗浄は研削材を投射するウェットブラストと同様に、床や壁面等の平面で衝撃力を受け止められる固定物に有効である。これに対し、立体状の砂利を有効に除染するには工夫が必要であった。

まず、砂利を固定して衝撃力を与えるために金網で挟んだ状態にして水を投射した。

粒径が小さい砂利は、衝撃力に固定しきれず動いてしまうために除染効果は低い。また、粒径が大きい砂利は、投射された表面は高い除染効果が得られるが、投射できない側面もあり除染ムラがでてしまう。砂利を固定する方法では除染効率が悪く、また、処理量も多く取れないため効率的でない。

次に、投射するノズルを固定し、砂利が万遍に当たるようポットミキサーで攪拌しながら水を投射した。粒径が小さい砂利は、水の衝撃力で吹き飛ばされるため除染に不適である。粒径が大きい砂利は、ノズルの向きを適切に固定することで水圧と水量に応じた除染効果を確認した。

### ・ 超高压水洗浄機を使用した場合

噴射ノズルの径を調整することで吐出する水量を調整できることから、石の材質に合わせ水圧と水量から、石に対する衝撃力を調整可能である。

これまで高圧水洗浄機と超高压水洗浄機はさまざまな比較試験を行ったが、内容を確認すると物理

的効果である「速度×重量×硬度＝研削力」に比例した結果が見える。

改めて機械的特性を確認すると、圧力上昇と共にノズル噴出後の水の推進速度、水量（重量）、水が衝撃する際の硬度が上昇する。ノズルサイズが変れば同圧力時の吐出水量が可変できる。

これらの条件はノズル1つの研削力を表しているが、研削力はいくまで石の圧縮強度を上回る圧力を発生させなければ研削が発生しないと推察できる。圧力が石の圧縮強度よりも低ければ水の衝突の時点で石は移動してしまうだけである。

表 4.4 高圧水洗浄機および超高圧水洗浄機の圧力と水量

使用機械	ノズル数 (個)	洗浄圧力 (MPa)	ノズル 流速 (m/s)	水量(L/min)		反力(衝撃力)(N)	
				ノズル 単体	全体	ノズル 単体	全体
高圧 洗浄機	1	20	200	14.61	14.64	49	49
超高圧 洗浄機	5	100	447	0.79	3.93	6	29
		200	632	1.11	5.56	12	59
		250	707	1.24	6.22	15	73
		200	632	1.66	8.31	18	88
		200	632	3.97	19.85	42	209

表 4.4 の通り高圧水洗浄機はノズル1つ、超高圧水洗浄機はノズルを5つ使用している。高圧水洗浄機と超高圧水洗浄器を比較すると、高圧水洗浄機の圧力は大幅に低い、ノズルあたりの衝撃力（反力）は高圧水洗浄機のほうが大きいことがわかる。

これは水が衝突した瞬間に石は研削されないまま移動させられている可能性が高い。

超高圧水洗浄機のノズルは、全ての石の圧縮強度を超える 150MPa (1500kgf/cm<sup>2</sup>) 以上の圧力を発生させることができるため、水が石へ衝突した瞬間に研削効果が発生させられると推察できる。さらにノズルの数が5個であることから、石表面積あたりの洗浄時間が短縮できる可能性が高い。ウェットブラストの小粒径と大粒径の違いと同じように単位面積当たりの打撃回数が増えるため石表層への研削回数が多いと推察できる。

また、吐出水量の変化（ノズルサイズの変化）は対象物へ与えるエネルギーをノズルの推進方向へ伸ばす性質があると考えられる。「吐出水量が増える＝重さが増える」につながるため、慣性の法則により破壊エネルギーは推進方向へ伸びる。圧力が石の圧縮強度を超えていれば石への破壊エネルギーは石の深さ方向へ伸びる傾向にあると考えられる。

石の圧縮強度よりも低い圧力であれば破壊は起こらないまま、ノズルの噴射流速に近い速度で石が吹き飛ばされると考えられる。

その他、ポットミキサーと高圧・超高圧水洗浄機を組み合わせた「複合的な」工法の除染試験も行った。これは、対象となる砂利の石1個に対してより「立体的」に洗浄を行うために実証した方法であり、各洗浄試験機の「利点」が組み合わせり、単独の試験機に比べ石の表面を均一的に洗浄できることが可能であることが検証できた。

以上の条件を加味した上で試験結果を確認すると条件通りの試験結果となることがわかる。

20MPa の高圧水洗浄機の研削率に注目すると、本来石の圧縮強度を下回る高圧水洗浄機の研削能力が圧縮強度の一番高い石（リフレ富岡）において高い研削効果を示している。これは水流が 200m/s

に近い速度で石を吹き飛ばし、ポットミキサーの内部もしくは石同士の衝撃で割れてしまい、研削されている状態にあるといえる。リフレ富岡の砂利（花崗岩）は、研磨機で行った試験結果から、摩砕による研削はし難いが、衝撃には脆いといえる。

また、研削効果に対し低減率が下げ止まっているのは石表層の汚染部が剥離できていない状態にあるといえる。粒径の大きな石（2種類のバラスト）においては、データとして研削率は低くあらわされている。バラストに関しては石本体の重量があることで吹き飛ばされなかったと推察できる。

低減率においては結果がバラバラにでているのは、石に汚染物質が強くむすびついていなかったこと、石に100MPaの超高压洗浄が汚れを洗い流すだけの水量が足り無かったことなどが考えられる。概ね超高压200MPaでは安定して効果を出している。これは確実に表層を研削し汚染物質を剥離できていると考えられる。

これらの条件を加味した上で高压・超高压水を利用した砂利の除染を行うには次の式に代入して設定を行う必要があると予測できる。

### 高压水における除染効率の算出法

#### 石の圧縮強度以上の圧力×放射性物質の付着深さ以上の水量×ノズル本数

この物理的効果は制止する一つのノズルから発生するエネルギーの指標であるが、噴射時の水の動き（回転、ノズル形状）、ノズル数、衝突までの距離（スタンドオフ）、移動速度などを加味すると研削効果（除染効果）は大きく変化する。

圧力が効果における最も高いセレクトィビティーを示すため、一般的には圧力を優先して考慮しがちだが、実際はそれ以外の要素が非常に常用な位置づけであるといえる。

特に超高压水洗浄機はそれらすべての要素を広い範囲で変化させることが容易な機器であり、すべての条件が合致すれば満足する効果を上げられる装置であると推察できる。

## 4.2 花崗岩の低減率と研削率の相関関係

2012年度に実施した花崗岩の除染試験（福島技術本部 研究開発成果報告会～環境回復に向けての取り組み～住宅敷地内砂利の除染～摩砕方式と超音波洗浄方式～）においては、摩砕方式（湿式）及び超音波洗浄方式を使用して、研削率と低減率の関係（摩砕方式）を検証している。

本試験においても、モルタルミキサーやポットミキサーを使用した工法を用いて花崗岩の除染試験を行った。

モルタルミキサーにおいては、砂利の洗浄時に攪拌羽根とミキサー壁面・底面に石が挟まり、洗浄が困難であることが確認できた。

ポットミキサーにおいては内部の攪拌羽根がないため、石が均等に攪拌され、砂利の除染効果があることが確認できた。

図4.3に2012年度に実施した花崗岩の除染試験の研削率と低減率の結果を、図4.4に2013年度に実施した花崗岩（リフレ富岡）の砂利を使用したポットミキサーにおける研削率と低減率の関係を示す。

また、図4.4のグラフには、併せてポットミキサーと高压水洗浄機（20MPa）または超高压水洗浄

機（200MPa）を組み合わせた工法における研削率と低減率の関係も示す。

なお、それぞれ図表の研削率、低減率の数値においては、2012 年度に実施した試験とは測定方法が異なるために直接的な比較ができないことを先に述べておく。

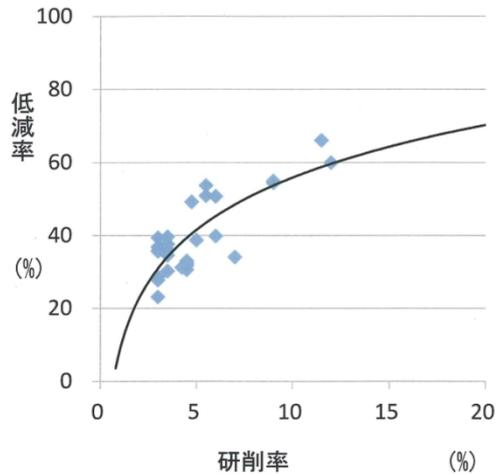


図 4.3 花崗岩の研削率と表面汚染密度の低減率の関係 (H24 年度の試験結果)

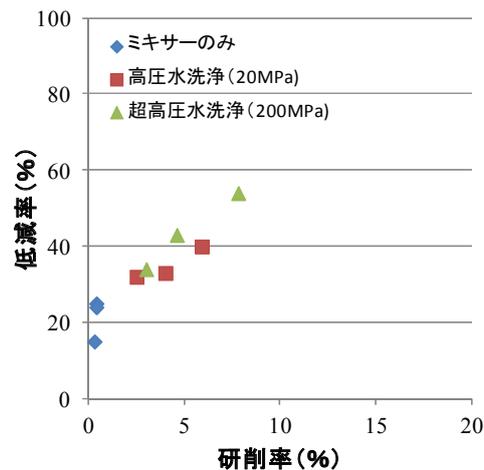


図 4.4 花崗岩の研削率と表面汚染密度の低減率の関係 (H25 年度の試験結果)

図 4.3～4.4 より、研削率の増加とともに低減率も増加する同じ傾向が得られた。

また、低減率の増加率は、研削率の数値によりほぼ同様の結果が得られており、2012 年度の試験結果の再現性が得られている。

これらのことから、砂利の研削率によって、低減率が変化することが確認できた。

#### 4.3 JR 常磐線の砂利（バラスト）の有効な砂利の除染方法

本除染試験で使用したバラストは、「夜ノ森駅」及び「太田陸前浜街道踏切」の 2 種類である。粒径が約 1～8cm 程度と大きさが不均等であり、形状も多角形のものが多い。どちらも石の強度は高く、3.1 節のイメージングプレートでの試験結果から石の表面に付着した放射性物質は、洗浄作業後、砂利の

窪み部分に付着した部分や洗浄しきれなかった部分に存在していることが考えられる。

このような特徴から、バラストの除染方法としては石を「立体的」に洗浄することが必要である。試験方法の中では、ポットミキサーと高圧または超高压水洗浄機を組み合わせた工法が高い除染効果を持つ結果となった。

この工法では、ポットミキサーによる石の攪拌・石同士研削と高圧・超高压水洗浄機による石同士の研削により除去できなかった放射性物質の剥離、洗浄を同時に行うことができるために、多角形の石を除染する工法としては効果が高い。

バラストの石は、洗浄前後で石の形状を大きく変化させないことが重要であるが、この工法では研削率が2.5%以下（2.4.3項参照）と少ないことも利点の一つである。

また、2.4.3項の試験結果より、放射線量の低減率の幅は洗浄開始4～8分後が最も高く、バラストの石の表面に付着した放射性物質や砂・土として付着した放射性物質がこの時間内に多く除去されており、石表面を研削するより洗浄により石の汚れを落とすことが重要である。

今後、バラストの砂利を大量に除染するためには、以下のことが重要である。

- ① ポットミキサーの特長（攪拌による石同士の研削効果）を持つ大型のミキサーを使用する。
- ② ミキサーの大きさに合わせ、高圧または超高压水洗浄機の本数を増加させ、ミキサー内での高圧または超高压水洗浄機の洗浄効果をより均等にさせる。

この大型のミキサーを使用した場合、ミキサーへの砂利の投入、洗浄後の砂利の取り出しに時間を要するため、ベルトコンベア等の移動装置を用いて砂利を移動させながら高圧または超高压水洗浄を行うことも効果的であると考えられる。

高圧または超高压水洗浄機とポットミキサーまたはベルトコンベアのどちらを組み合わせた場合においても、洗浄機から噴射された水が石に衝突し、除染水の一部が噴霧状となって周囲に飛散することがある。そのため装置全体または水洗浄機の周囲をビニールボックスのような小屋で覆い、放射性物質の飛散の拡大及び二次汚染の防止を行う必要がある。

実際にバラストを除染する場合は、除染により目標とする放射線量や低減率を明確にした機器の組み合わせが必要である。

## 5. おわりに

今回の「砂利の除染試験」では、3つの方式（キャビテーション、摩砕及びブラスト）、6種類の機器（超音波洗浄機、研磨機、モルタルミキサー、ウエットブラスト、高圧水洗浄機及び超高圧水洗浄機）を用いて、富岡町内の4箇所の砂利（民家の庭、リフレ富岡の屋上、リフレ富岡の庭、役場車庫の屋上）と2箇所のブラスト（夜ノ森駅、太田陸前浜街道踏切）を採取して試験を実施した。

本試験は1年で終了する予定であったが2年にわたり実施した。当初、放射性セシウムで汚染した砂利は表面に付着しているため、表面を薄く削れば比較的容易に除染できると考え、表面が確実に削れ、かつ二次廃棄物を出来るだけださない方法を検討して摩砕方式を選択した。また、当時摩砕方式と並行して行った超音波洗浄機を用いたキャビテーション方式は、砂利表面の微細な空隙に入り込んだ放射性セシウムを剥がせる可能性があるかと推測し実施した。

初年度に実施した槽底のパルセーターが回転する摩砕方式による結果では、研削率を上げても低減率が比例して上がらないことが分かり、その原因として放射性セシウムが砂利の凹部や溝深くに残っているか、表面より内部に部分的に入り込んでいる可能性があり、より効率的に砂利表面を削れる方法を検討し試験を継続することとした。また、砂利の形状や材質も多様にあることから、2年目の試験では、対象とする砂利の種類を増やすとともにブラストも加えて実施した。以下に試験概要を記す。

- 1) 先ず、摩砕方式として試験に用いたモルタルミキサーは、建設現場で使われる砂（細骨材）とセメントと水とを練り混ぜる機器であり槽内の回転羽根で攪拌する。回転数が150rpmと比較的速いため、砂利の共摺りに適用できると考え選択した。しかし、砂利の粒径が約1cm以上だと槽と回転羽根に噛み込んでしまい回転できないことが分かり、試験も民家の砂利1種類のみになってしまった。摩砕においては、水を加えない方が研削しやすいと推測するが、研削物が作業場所周囲に飛散させてしまうため、十分な飛散防止対策を取る必要がある。このため、水を添加し除染水として回収する方法を選択した。試験では、水の量を変えずに砂利の量を20kgと40kgの二つの条件で実施し、水の割合の少ない方が効率的に研削することが分かった。しかし、水が極端に少ないと砂利と除染水の分離作業が難しくなるため、砂利が水に浸る程度が適すると推察する。
- 2) 研削材を用いるウエットブラストは、金属部品のバリ取りや古い塗料の剥ぎ取り等に使用するものであり圧縮空気の水とともに研削材を投射する。研削材であるアルミナは1,961MPaを超える非常に強い圧縮強度をもっており、高い除染効果が得られる可能性があったため選択した。ただ、研削材が二次廃棄物として発生してしまうため、大量の処理には不向きであり、主に除染能力を確認することを目的として実施した。試験では、砂利を見ながらハンドガンで操作できたこともあるが、他の方式よりも高い除染効果があった。
- 3) 高圧水洗浄は、除染作業に使用されている20MPaクラスの圧力を持つものと、100MPa以上の圧力を持つ超高圧水洗浄機がある。特に、超高圧水洗浄は平成23年度に内閣府から受託した福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務報告書 - 除染技術実

証試験事業編, JAEA-Review 2013-053, 2014, 84p.<sup>4)</sup>、平成 25 年 研究開発成果報告会～環境回復に向けての取り組み～要旨集帰還困難区域の路面における 超高压水除染技術の適用, 2013.)<sup>5)</sup>において、コンクリートやアスファルトの除染において高い効果が得られていたため選択した。試験では、砂利を固定した場合と回転させた場合で行い、どちらもガンタイプのノズルで砂利に投射した。固定した試験では、飛沫や蒸気のために砂利が見えないこともあり、側部等に投射できず効率的でないことを確認した。また、回転させた試験では混練機を用いて攪拌しながら投射した。試験の結果、最大水圧の 250MPa で水量を約 6ℓ/min に抑えた場合は、表面線量率の低減率が約 60%であるのに対し、水圧 200MPa で水量を約 20ℓ/min にした場合は、低減率が約 85%と除染効果が高くなることが分かった。砂利に与える衝撃力  $< \text{衝撃力[N]} = 0.7448 \times \text{水量[L/min]} \times (\text{水圧[MPa]})^{0.5} >$  を計算したところ、水圧 200MPa (約 210N) の方が水圧 250MPa (約 70N) の 3 倍近く衝撃力の強いことが分かった。

- 4) 各除染方式から、粒径がある程度大きい砂利については、除染効果及びバッチ処理や連続処理にも対応できる超高压水洗浄による方法が適すると判断した。例えば、大きな粒径の砂利やバラストを大量かつ効率的に除染する方法の一つの案として、生コン設備で使用されているコンベア等で移動させながら振動や回転を与え、連続的に処理することが有効であると考えられる。

以上の試験結果から、砂利の特徴に応じた除染方式による適用性(表 4.3 砂利別除染方法の適用性総括表)、また、除染効果(低減率)がどれだけ得られるか(2.4.3.5 圧力と水量の違いにおける除染効果の確認)を確認できた。一括りに砂利といっても特徴があり、一つの除染方法で全ての砂利には適用できないことが分かった。また、同じ場所から採取した砂利でも個々の汚染状態に大きなバラツキがあることも分かった。このため、除染前後の測定では、汚染状態のバラつきに応じた手法と手順、仕様を採用することが肝要である。

砂利の除染作業を行うときは、砂利の特徴及び処理する量を事前に把握して、適切な除染方法と計画を立てる必要がある。

## 謝辞

この試験を進めるにあたって、富岡町復興推進課の皆様には、本試験の意義をご理解下さり、試験場所として富岡町役場内施設の貸与、富岡町内の複数の砂利をご提供いただいた。また、復興庁参事官の松本真太郎様には、現在長期運休している除染特別地域の JR 常磐線の情報提供の御協力をいただいた。東日本旅客鉄道（株）復興企画部藤澤様には、バラストに関する情報及び常磐線富岡町区間内のバラストをご提供いただいた。ここに記して、深く謝意を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 環境省，除染関係ガイドライン平成 25 年 5 月第 2 版
- 2) 日本原子力研究開発機構 除染モデル実証事業編 報告書
- 3) 小原 二郎，「建築内装技術ハンドブック」朝倉書店，1984.
- 4) 渡辺 将久，田川 明広：福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務報告書 - 除染技術実証試験事業編，JAEA-Review 2013-053,2014,84p.
- 5) 田川 明広：平成 25 年 研究開発成果報告会～環境回復に向けての取り組み～要旨集 帰還困難区域の路面における 超高压水除染技術の適用，2013.
- 6) 加藤 貢：平成 25 年 研究開発成果報告会～環境回復に向けての取り組み～要旨集 住宅敷地内砂利の除染～摩砕方式と超音波洗浄方式～，2013.

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 <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	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 <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
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 <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> 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間は同一である。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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
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 <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
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 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
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 <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	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 <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> 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 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> 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 <sup>11</sup> 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=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 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 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(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「△」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 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> 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 <sup>-4</sup> 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=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

