

委託業務成果報告書

平成 23 年度「除染技術実証試験事業」

モルクラスターオゾン水による各種構造物の除染実証試験

ネイチャーズ株式会社

代表取締役 松村栄治

2012 年 3 月 20 日

目 次

1. 緒言

1.1 はじめに

1.2 除染の原理

1.2.1 除染の基本原理

1.2.2 モルクラスターオゾン水とは

2. ラボ試験

2.1 ラボテスト試験 A

アスファルト・コンクリートに浸透した化学物質の溶出実験

2.2 ラボテスト試験 B

コンクリート・アスファルトに浸透した安定セシウムの溶出実験

3. フィールド試験

3.1 フィールド試験 1 郡山市待池台

3.2 フィールド試験 2 双葉郡浪江町赤宇木

3.3 フィールド試験 3 郡山市池ノ台

4. モルクラスターオゾン水除染に関連する試験

4.1 土壌中でのセシウム移行とセシウム再結着（固定）の確認試験

4.2 溶出除去された処理水（処理を終えたモルクラオゾン水）からセシウムを 捕捉する水処理効果の確認試験

4.3 モルクラオゾン水除染における安全対策と環境オゾン濃度

4.4 除染作業の効率化試験

5. 総括

参考データー

フィールド試験 伊達市霊山町・双葉郡浪江町赤宇木

安全作業自主基準

1. 緒言

1.1 はじめに：事故状況と対応の現状

東京電力福島第一原子力発電所の外部交流電源の喪失に伴う事故は、国際原子力・放射線事象評価尺度（INES）で最悪のレベル7となり、被覆管と燃料の溶融に伴う水素爆発やベントによって環境へ放出された放射性物質の量は、セシウム-134,137（Cs-134,137）だけでも数万 TBq とチェルノブイリ事故に匹敵する大事故となった。

チェルノブイリ事故による Cs-134,137 の放出量は 85,000TBq と今回の事故よりも数倍多かったが、ベントや爆発による吹き上げ高さは福島事故の方が低く、また、降雨・降雪があったため、局所的にはチェルノブイリよりも深刻な汚染が観測される高濃度汚染地帯（ホットスポット）も各地に出現している。

また、わが国の人口密度はロシア共和国（事故時はソビエト連邦）のチェルノブイリ付近よりも格段に高いため、早期に効果的な除染措置をとらないと、集団線量という観点に立ったときの発ガンリスクは、今回の福島原発における事故の方が高くなる可能性もあると推測される。

したがって、大量に放出された放射性物質を、住居圏や農耕作圏、さらには放射性物質のリザーバーとなりうる森林圏や海底土圏（今回の実証事業では海洋環境は対象外）から早期に除去する必要があるが、現状では福島県内の学校校庭における土木工学的手法を用いた除染や通学路の路面、側溝の高圧水道水除染など、限定的な対応しか実質的にはとられておらず、早急に抜本的対策をとる必要がある。

以上の状況に鑑み、様々な除洗技術が検討されているが、廃土・客土などの土木工学的な除染が効果的なエリアは、校庭や畑など平坦で比較的広い土地に限られており、住宅地や森林内には大型機械を搬入できないことから人海戦術に頼らざるを得ず、除染には膨大な時間と人員が必要となるものと考えられる。また、作業に伴い、作業員の被ばく（外部被ばくのみならず埃の吸引等による内部被ばくも）管理も重要な課題である。

さらには、除染によって発生する莫大な量の土壌や瓦礫、樹木（あるいはその焼却灰）などの仮置き場、中間処理施設や最終処分場の選定にも苦慮している状況にある。

今回の事故で問題となる放射性核種は、実質上 Cs-134,137 であると考えられ、特に長期的な観点に立った場合は半減期が 30 年と長い Cs-137 のみである。ヨウ素-131 は半減期が短いことからすでに減衰しており、また、ストロンチウム-90 の降下量も Cs-134,137 に比べ格段に低いことが確認されている。

土木工学的手法の一つである篩わけ効果を応用した粘土質（Cs-137 濃度が高

い) の除去は、原子力委員会でも報告されており、有望な手法であるとみられているが、基本的には土壌にしか適用できず、また、現段階ではバッチ処理あるいはセミバッチ処理であることからスループットが低く、処理によって集積された高レベルの粘土質の処分方法も脱水による減容化しか見つかっていない。

一方、植物を用いた環境修復、いわゆるファイトレメディエーションについては実用的でないとの結論がすでに出されている（ひまわりについては移行係数が 0.0005）。

その他にも、水相の Cs-137 を吸着する材料として用いられているゼオライトや、体内に取り込まれた Cs-137 の排泄を促すプルシアンブルーを土壌に添加する実験、セシウムを選択的に摂取する微生物を用いた実験等が産・官・学の各方面で進められてきているが、どの方法にも実用化にあたっては問題点があり革新的、すなわち簡単な方法で、どのような対象物からも効率よく Cs-137 を除染できる技術は未だ開発されていない。

放射性核種のコンクリート、アスファルト、建材等への吸着力、結合力や土壌中における鉛直方向への移行速度は、放射性核種の種類や対象構造物の種類、マクロ的・ミクロ的な水理力学状態によって大きく変わる。

Cs-134,137 は土壌やコンクリートに吸着すると表面の有機物と錯体を形成し、さらに時間をかけて母材である粘土鉱物の結晶構造中へ取り込まれて行くことから、粘土鉱物、すなわち土壌粒子やコンクリートがウエザリング等で移動しない限り実質上移行しなくなる。ちなみに申請者らが核燃料サイクル機構で実施したカラム試験の結果から、土壌中における Cs-134,137 の移行速度は 0.5～1cm/年であることが明らかとなっている。この結果は実環境における Cs-137 の深度分布とも符合する。

これらコンクリートや土壌粒子表面の有機物、あるいは粒子中心部の無機母材を分解するためには、強酸や強アルカリが必要であり、実験室レベルでは実現できるものの、実環境への適用は現実的ではない。

この Cs-137 を様々な構造物から剥離・溶解させる化学薬剤の代替物質として申請者は酸化力が極めて強いオゾン水に着目した。しかし、従来のオゾン水では、生成後すぐに脱気してしまうという特性があった。

そこで、特殊なオゾン水であるモルクラスターオゾン水を用いることにした。モルクラスターオゾン水とはオゾン を 10nm 以下の気泡として水に分散させたものであり、一般的な散気法によるオゾン水と比べ濃度が高く、かつ、貯留できる（一般のオゾン水の濃度半減期はすぐに脱気することから約 1 分であるが、モルクラスターオゾン水は実質上脱気しないため半減期が約 25 時間）という特性を持つことから、オゾンが有する強力な酸化力により、様々な対象物から Cs-137 を剥離・溶出させ、洗い流せる可能性があると考えられた。

そこで、汚染レベルの異なる 3 箇所の除染対象地域において森林、宅地、大型建造物、建物、道路等をモルクラスターオゾン水で洗浄し、Cs-137 の除染率（除染係数）を算出することにより、モルクラスターオゾン水の洗浄効果を定量的に評価するという除染モデル実証試験を提案した。

本手法が確立されることにより、路面、住居、教育施設、公園、農地（牧草地を含む）、廃材、森林等、あらゆる対象物（エリア）の除染が可能となるものと期待される。また、コンクリートの除染が可能であれば事故サイト内の瓦礫の除染や線量率が高く入室できない原子炉建屋内の除染にも活用できるものと考えられる。

申請者らは、すでに福島県内の汚染レベルが異なる 3 箇所（伊達市、双葉郡浪江町、郡山市）において、東京都市大学原子力研究所の協力のもと、アスファルト、コンクリート、金属、住宅建材、土壌、森林内堆積腐植、植物（葉、樹皮）等を対象とした除染試験を実施した。既存の技術では除染できなかった対象物においても良好な除染率が得られることを、放射線計測を専門とする東京都市大学の研究者とともに確認した。

除染対象地域は 1.3 万 km^2 に及ぶとみられ、また、除去物の量は当初 5mSv/y の地域エリアは表土を、また 1~5mSv/y のエリアは限定的に除染するとしていたが（現在は 1mSv/y 以上のエリアは除染と変更）、当初の想定分だけでも 2,900 万 m^3 と見積もられている。

本実証事業の結果を実際の除染処理に適用することにより、仮置き場問題という重い負担の伴わない、生活圏の広域な線量低減を短期間に実現しうる。

本技術が早期に実用化され、あらゆる地域のあらゆる対象物が除染されることにより、発ガン等のリスクが大幅に低減されることを願ってやまない。

【参考文献】

- 松村栄治 他：農林水産省「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」
研究課題名「高純度・高溶解オゾン水による家畜の防疫体制強化法の開発」
(2006-2008)
- 松村栄治 他：農林水産省総合食料局「食品産業競争力強化対策事業／食品産業グリーンプロジェクト技術実証モデル事業」課題名「鶏肉加工業者から排出される羽毛を工業的に活用するための技術実証」(2009)
- 松村栄治：「ナノピコバブル封入技術の特性と食品産業における殺菌利用・排水処理効率化の現状」食品と開発 Vol. 45 12-14 (2010. 7)
- 松村栄治：「ナノピコバブルの食品工業分野への応用」食品工業 56-64 (2011. 11)

森田重光 他：誘導結合プラズマ質量分析装置を用いた環境試料中長半減期放射性核種の定量, 動燃技報, 81:104-107 (1992)

森田重光 他：土壌環境中における超半減期放射性核種の移行挙動について, 環境中微量物質の挙動パラメータ検討専門研究報告書, 環境中微量物質の挙動パラメータ検討専門研究会, 京都大学 (1995)

Morita, S. *et al.*, Study on distribution and behavior of long-lived radionuclides in surface soil environment, *Improvement of Environmental Transfer Models and Parameters*, 207-215 (1996)

森田茂樹, 海底土への放射性核種の移行・蓄積機構, 茨城県沿岸海域における海洋放射能研究の概要, 茨城県公害技術センター年報(1989)

小林宏信, 土壌・作物体中の放射性物質とその動き, 土壌汚染の機構と解析, 産業図書(1979)

汚染物質の環境挙動予測に関する局地規模詳細モデルならびにその移行パラメータに関する研究, 原子力基盤技術総合的研究委員会報告, 原子力基盤技術総合的研究委員会, 科学技術庁 (1995)

陸域環境における放射性核種の移行に関する動的解析モデルの開発, 原子力基盤技術総合的研究委員会報告, 原子力基盤技術総合的研究委員会, 科学技術庁 (1996)

チェルノブイリ事故後 10 年の放射線による環境影響, 原子力施設事故情報調査専門委員会報告, 原子力施設事故情報調査専門委員会, 原子力安全研究協会 (1998)

陸域環境における放射性核種の移行に関する動的解析モデルの開発 第 2 期報告, 原子力基盤技術総合的研究委員会報告, 原子力基盤技術総合的研究委員会, 科学技術庁 (1999)

土壌-植物系における核種移行に関する研究, 原子力基盤技術総合的研究委員会報告, 原子力基盤技術総合的研究委員会, 科学技術庁 (1999)

1.2 除染の原理

1.2.1 除染の基本原則

濃度が高く、かつ、貯留できるモルクラスターオゾン水は強力な酸化剤であることから、

- ・構造物に吸着している Cs-137 (金属, アスファルト, 植物等)
- ・構造物と錯体を形成している Cs-137 (土壌, 森林内腐植質等)
- ・粘土鉱物の結晶構造の中に取り込まれている Cs-137 (土壌, コンクリート等)

を対象物から化学的に酸化分解反応により顕著に溶出させ、洗い流すことができることが基礎実験の結果から明らかになっている。

このモルクラスターオゾン水の酸化力を用いることにより、高圧水道水洗浄などの従来の技術では除染できなかったコンクリート、アスファルト、金属、その他の建材、土壌、森林内腐植質、牧草、芝生、樹木等を基本的に原位置で除染するというのが、今回提案する除染技術の基本原則である。

当該技術は除染をする対象物を限定せず、高濃度の脱気しにくいオゾン水を対象物に散水・噴霧するという単純な作業で、Cs-137 を対象物から剥離・溶出させようとする革新的な除染技術である。

本技術は、

- ・どのような材質・形状の対象物でも除染できる
従って、広域面を対象物を選ばずに洗浄できることから、生活圏をくまなく除染して空間線量率を低減することができる
- ・原位置 (*in situ*) で処理ができる
- ・基本的に除去物が発生しない
- ・一般的な高圧水道水洗浄で除染できないコンクリートやアスファルトも除染できる
- ・除洗作業が単純で高圧水道水洗浄と同じように簡単に除染できる
- ・散布するだけなのでスループットが高い (処理時間が短い/除染効率が高い)
- ・オゾンの残留や毒性を有する副生成物の発生がなく、人体および環境に対する負荷が実質上ないなど、除染技術として具備すべき優れた特徴を有する。

なお、実際の除染時にはモルクラスターオゾン水の酸化力だけでなく、他の酸化剤を併用することによる促進酸化効果や、Cs-137 とイオン半径が近いアンモニウムイオンとの置換効果なども併用してより高い除染率 (90%) を目指す。

1.2.2 モルクラスターオゾン水とは (モルクラオゾン水とも記載)

ネイチャーズ株式会社では、特殊な形状の液体 - ガス混合部に毎秒 30m 以上の高速で水を流し、同時にオゾン真空導入しながら混合することにより、高密度のスーパーキャビテーションを発生させる、スーパーキャビテーションと

いえる激しい気液混合状態の過程に磁気回路により流れに直交する強度の磁場を与えるとというプロセスを繰り返すことで水の分子及びオゾンガスに特異な分散効果を与え、極めて微細な気泡を高密度かつ安定的に生成させる技術を開発し特許を取得した。

このモルクラスター技術により生成されたオゾン水の気泡粒径を動的光散乱式粒度分布測定装置(堀場製作所製 LB-550)で測定したところ、粒径の平均値、中央値、最頻値のいずれもが 10nm 以下であり、実質上浮力の影響を受けない(すなわち脱気し難くい)ことが明らかとなっている。また、気泡の密度も 1mL 中に数十兆個存在することから高濃度に調製できることが半導体製造プロセス/ウルトラクリーンテクノロジーに於ける精密な計測により確認されている。

本来、水に対して難溶解性であるオゾンは気泡でオゾン水中に存在するが、専門家の間で浮力を受けない気泡径が 500nm であるところ、5nm 程度と全く浮力を受けない超微細気泡で存在している。さらに、水中に気泡でなくオゾン分子として分散して水の水素結合エネルギーを顕著に低下させるほど高密度に存在して長時間維持可能なことを確認し、ガス含有水として物質特許の出願もしている。つまり、モルクラスターオゾン水は、スーパーキャビテーションと磁気作用を併用することで、従来では考えられない気泡またはオゾンガスを著しい密度で水中に保持する技術であり、オゾン水の性状に関する常識を覆すものである。従来のオゾン水の弱点であったオゾン濃度の短時間内での低下と、容易に脱気する 2 つの弱点を克服した新型オゾン水といえる。酸化力が非常に強い一方で、反応後は無害な酸素に分解するという非常に扱いやすい酸化反応剤とも言える。尚、オゾンの特性として水分子と共に作用する環境(高湿度または水中)が、乾燥した気相環境に比較すると酸化反応性が極めて高いということもモルクラスターオゾン水の発現する効果に関連しているといえる。

周囲を断熱材で覆ったステンレスタンクに、チラーあるいは氷で水温を約 5℃ とした冷水を貯留し、その貯留した冷水を原水としてモルクラスターオゾン水を生成した場合、大気圧下でも非常に高濃度(最大 60ppm 以上)に調製することができる。

また、従来のオゾン水生成装置は、大気圧下では低濃度のオゾン水を毎分数リットル生成する程度の能力しか有しておらず、貯留することは不可能であるが、モルクラスターオゾン水生成装置は、生成速度が極めて早く、装置規模にもよるが、高濃度のオゾン水を毎時トンレベルで生成できるという優れた特徴を有している。

オゾンは難溶解性のガスであることから脱気しやすく、濃度が半分になるまでの時間(半減期)は 1 分以下であるとされている。したがって、たとえば配管に一般のオゾン水を送水しても 10~20m 通水した地点で、既に濃度は初期濃

度の半分以下に減衰し、ユースポイントではオゾン水は得られず、水中から脱気したオゾンガスが発生するだけになってしまう危険性も考えられる。しかし、モルクラスターオゾン水の半減期は常圧下でも約 25 時間と長く、配管中に当該オゾン水を通水し、200m 送水した後のオゾン濃度の低下はわずか 10%以下であることを実験的に確認している。つまり、あらかじめ除染に必要な量のオゾン水を生成し、タンク内に貯留しておくことにより、必要な時に必要な量のオゾン水をユースポイントまで直接送水あるいはタンクで移送し、散布できるのである。

なお、モルクラスターオゾン水は減衰し難い、つまり脱気し難いことからオゾンガスの発生量が少なく、同じ濃度の従来オゾン水（比較する一般オゾン水では、濃度 7ppm が限界であった為に低濃度で比較した事例）と比較すると、脱気オゾンガスは 1/100 以下と著しく少なく、人体に有害なオゾンガスの危険性が低い。

環境汚染という観点からもオゾンは有機物などと反応した後は速やかに酸素に分解されることから、実質上影響がない。モルクラスターオゾン水は高濃度に生成しても pH は原水と同じ中性であり、散布した後に環境を変えることはなく、植物に散布して洗浄した場合などでも、植物に形態的な変化はなく、組織学的にも変化がないことを確認している。

モルクラスターオゾン水（生成手段の異なる近似する弊社名称ではナノピコと表示している）は、農林水産省の家畜疫病防除（口蹄疫や高病原性鳥インフルエンザウイルスを対象とした）や、食品衛生（殺菌関連）の分野で国費研究を複数受託した経歴があり、従来オゾン水との違いは有識者の評価を受けている。

2. ラボ試験

2.1 ラボテスト試験 A

アスファルト・コンクリートに浸透した化学物質の溶出実験

2.1.1 実験計画

【実験目的】

サンプルピースではなく、現場に近い面積の除染の効果を調べることを目的として、アスファルトおよびコンクリート表面にウラニンを噴霧した再現汚染エリアを用意し、同一流量でモルクラスターオゾン水、モルクラスターオゾン水+紫外線照射および水道水を散水することにより、各洗浄方法の比較をし、洗浄効率を明らかにする。

なお、ウラニンは実験台上の除染調査や海流を調べる実験等で用いられる染料で、ブラックライトを照射することにより蛍光を発することから目視でアスファルトやコンクリートへの浸透状態を観察することができる化学物質である。

また、本実験ではモルクラスターオゾン水の酸化反応をさらに高める方法として紫外線照射装置をノズル近傍に配置する器具を作製し、オゾン水が対象面に接触する時点の反応を高める手段も試みる。

【実験材料】

[対象面]

[区画条件]

アスファルト面：1区画あたり 3m×5m（実際の路面）3区画
1区画あたり 1m×1m（実際の路面）3区画
1区画あたり 10cm×10cm（実際の路面）3区画
コンクリート面：1区画あたり 3m×5m（実際の路面）3区画
1区画あたり 1m×1m（実際の路面）3区画
1区画あたり 10cm×10cm（実際の路面）3区画

ウラニン：和光純薬工業 CSA.NO 518-47-8

器具等一式：ガラス棒，50mL 遠沈管，バケツ
噴霧器

バーナー+プロパンボンベ

非接触温度計

0.3MPa モルクラスターオゾン水（5.2L/分）

8.8MPa 水道水 (5L/分) 高圧洗浄機による
紫外線照射装置 (ネイチャーズ試作)
ブラックライト

【実験方法】

【アスファルト面・コンクリート面の作製】

① アスファルト面, コンクリート面をバーナーで加熱する。この操作は現場で長期間経過した状態 (セメント, タールへの取り込み等) を表現するための工程である。※注

アスファルト面, コンクリート面の表面温度が 70℃になったらウラニン溶液を霧吹き機で均一に散布する。路面温度は非接触温度計で計測する。

② ウラニン散布後は, 4 時間以上放置する。

③ 洗浄条件 :

アスファルト面, コンクリート面は以下の条件で洗浄する。

- a. 0.3MPa モルクラスターオゾン水 (5.2L/分) で 3m×5m 区は 10 分間, 1m×1m 区は 5 分間, 10cm×10cm 区は 3 分間洗浄する。
- b. 0.3MPa モルクラスターオゾン水 (5.2L/分) で 3m×5m 区は 10 分間, 1m×1m 区は 5 分間, 10cm×10cm 区は 3 分間洗浄しながら, 同時に噴射位置に紫外線を照射していく。
- c. 8.8MPa 水道水 (5L/分) で 3m×5m 区は 10 分間, 1m×1m 区は 5 分間, 10cm×10cm 区は 3 分間洗浄する。

④ 効果観察方法

ブラックライトでウラニンの除染状況を確認する。(夜間)

※注 バーナーでアスファルトやコンクリートを加熱するのは, 汚染現場を模擬するために本実験でのみ使用する工程であり, 実際の除染でバーナー等の下記を使用することはない。

【実験対象エリア】

現場に近い面積の除染の効果を調べることを目的として, アスファルトおよびコンクリート表面にウラニンを噴霧した汚染エリアを用意し, 洗浄効率を明らかにする。

2.1.2 アスファルト面からの溶出実験結果

2.1.2.1 高圧水道水 (8.8MPa) 洗浄

a. 3m×5m 区 10分洗浄

アスファルトはタール分と石材から成るが，洗浄後も石材と石材の隙間の汚れとウラニンが結合していった。

b. 1m×1m 区 5分洗浄

単位面積あたりの洗浄時間を 3m×5m 区の 7.5 倍にして洗浄したが，依然，洗浄後も石材と石材の隙間の汚れとウラニンが結合していた。

c. 10cm×10cm 区 3分洗浄

可視光で表面の状態を観察すると，明らかに削り取られているようであった。ウラニンの蛍光は弱くなったが，完全には消えなかった。

2.1.2.2 モルクラスターオゾン水 (0.3MPa) +紫外線洗浄

a. 3m×5m 区 10分洗浄

高圧水道水洗浄よりもウラニンが発する蛍光は弱くなったが，依然，石材と石材の隙間の汚れとウラニンが結合していた。

b. 1m×1m 区 5分洗浄

3m×5m 区よりは石材と石材の隙間の汚れが少なくなったが，石材を取り囲むように残る汚れとウラニンが結合していた。

c. 10cm×10cm 区 3分洗浄

可視光で表面の状態を観察しても削り取られている様子はなかった。ウラニンの蛍光は 1m×1m 区よりもさらに弱くなったが，完全には消えなかった。

2.1.2.3 モルクラスターオゾン水 (0.3MPa) 洗浄

a. 10cm×10cm 区 3分洗浄

この洗浄のみ 10cm×10cm 区から始めた。可視光で表面の状態を観察しても削り取られている様子はなかった。

b. 1m×1m 区 5分洗淨

高压水道水洗淨区よりも石材と石材の隙間の汚れが少なくなったが、石材を取り囲むように残る汚れとウラニンが結合していた。

c. 3m×5m 区 10分洗淨

高压水道水洗淨区よりもウラニンが発する蛍光は弱くなったが、依然、石材と石材の隙間の汚れとウラニンが結合していた。モルクラスターオゾン水+紫外線洗淨区との差はほとんど認められなかったが、若干モルクラスターオゾン水よりも少ないように感じられた。

したがって、ウラニンの蛍光はモルクラスターオゾン水 \leq モルクラスターオゾン水+紫外線水 $<$ 高压水道水洗淨の順となり、モルクラスターオゾン水の洗淨力が最も高いことが明らかとなった。

2.1.2.4 時間経過後の路面の状況

14時間後（昼間であることからブラックボックス使用）、24時間経過後に再度路面のウラニンの残存状況を確認した。前日の試験途中から断続的に降雨があったものの、ウラニンの残存状況に違いは見られなかった。

【コンクリート面からの溶出実験】

2.1.2.5 高压水道水（8.8MPa）洗淨

a. 3m×5m 区 10分洗淨

コンクリート面を水道水（栓水圧）で洗淨したところ、コンクリートに浸透したウラニンが浮かび上がってきた。浮かび上がらなくなるまで10分間散水した。その後、高压水道水で洗淨したが、洗淨直後からウラニンの浮かび上がりが強かった。

b. 1m×1m 区 5分洗淨

単位面積あたりの洗淨時間を3m×5m区の7.5倍にして洗淨したが、洗淨後のウラニンの浮かび上がりは3m×5m区と変わらなかった。

c. 10cm×10cm 区 3分洗淨

可視光で表面の状態を観察すると、明らかに削り取られているようであった。ウラニンの浮かび上がりは3m×5m区、1m×1m区と変わらなかった。

2.1.2.6 モルクラスターオゾン水（0.3MPa）+紫外線洗淨

a. 3m×5m 区 10分洗浄

コンクリート面を水道水（栓水圧）で洗浄したところ、コンクリートに浸透したウラニンが浮かび上がってきた。浮かび上がらなくなるまで20分間散水した。その後、モルクラスターオゾン水で洗浄したところ、高圧水道水と異なり洗浄直後のウラニンの浮かび上がりは少なかったが、15分程すると高圧水道水洗浄よりは少ないもののウラニンが浮かび上がり始めた。

路面には洗浄痕が残ったが、その幅は5cm程度であり、洗浄痕の蛍光の方が弱かった。

また、洗浄液とウラニンが接触すると瞬時に蛍光が消色した。これはオゾンと紫外線の反応によって生成される水酸基ラジカルが有機物の一種であるウラニンを化学的に分解しているものと考えられた。

b. 1m×1m 区 5分洗浄

単位面積あたりの洗浄時間を3m×5m区の7.5倍にして洗浄したが、洗浄後のウラニンの浮かび上がりは3m×5m区と変わらなかった。

c. 10cm×10cm 区 3分洗浄

可視光で表面の状態を観察すると、明らかに周囲よりもきれいになっていた（脱色していた）が削られている様子はなかった。ウラニンの浮かび上がりは3m×5m区、1m×1m区よりも格段に少なかった。

2.1.2.7 モルクラスターオゾン水（0.3MPa）洗浄

a. 3m×5m 区 10分洗浄

紫外線照射装置にモルクラスターオゾン水を散水するノズルを連結しているとコンクリート面をくまなく洗浄することが難しいことが3.2の実験で明らかとなったため、ノズルを手持ちにして洗浄することとした。

まず、コンクリート面を水道水（栓水圧）で洗浄したところ、コンクリートに浸透したウラニンが浮かび上がってきた。浮かび上がらなくなるまで20分間散水した。その後、モルクラスターオゾン水で洗浄したが、洗浄後のウラニンの蛍光は、モルクラスターオゾン水+紫外線区よりもさらに少なかった。

また、洗浄水のウラニン分解力は水酸基ラジカルほど急速でないものの、明らかに分解する様子（消色）が観察された。モルクラスターオゾン水も有機物を強力に分解することを確認できた。

b. 1m×1m 区 5分洗浄

洗浄後のウラニンの浮かび上がりは3m×5m区よりも大きかった。これは1m×1m区に雨水が残ったことから、浸透圧で表面に溶出してきたものと考えられた。

c. 10cm×10cm 区 3分洗浄

可視光で表面の状態を観察すると、明らかに周囲よりもきれいになっていた（脱色していた）が削られている様子はなかった。洗浄後のウラニンの蛍光は3m×5m区と変わらなかった。

2.1.2.8 時間経過後の路面の状況

8時間経過後に再度ウラニンの残存状況を確認した。ウラニンの浮かび上がり量は、高圧水道水>モルクラスターオゾン水>モルクラスターオゾン水+紫外線の順であったが、浮き上がったウラニンをふき取ったあとの路面表面の洗浄状態は、高圧水道水<モルクラスターオゾン水+紫外線<モルクラスターオゾン水の順で洗浄直後と変わらなかった。

2.2 ラボテスト試験 B

コンクリート・アスファルトに浸透した安定セシウムの溶出実験

【目的】

安定セシウムを、同一条件で添加して焼き付けたコンクリートとアスファルトのサンプルピースを「0.3MPa モルクラオゾン水」「0.3MPa モルクラオゾン水+紫外線」「8.8MPa 高圧水道水」で洗浄し、各手法の除染率を明らかにする。

2.2.2 コンクリート面の洗浄試験

表1 コンクリートからの安定セシウムの溶出率

試料No.	試料	試料容量(L)	Cs濃度(ppb)	Cs溶出量(μg)	Cs溶出率(%)	溶出率合計(%)
C-1	コンクリート, 0.3MPaO ₃ , 0-1分	10.2	14.0	142.8	35.7	58.2
C-2	コンクリート, 0.3MPaO ₃ , 1-2分	10.0	9.0	90.0	22.5	
C-3	硫安処理コンクリート, 0.3MPaO ₃ , 0-1分	10.4	15.0	156.0	39.0	70.2
C-4	硫安処理コンクリート, 0.3MPaO ₃ , 1-2分	10.4	12.0	124.8	31.2	
C-5	コンクリート, 0.3MPaO ₃ +紫外線, 0-1分	10.6	15.0	159.0	39.8	68.9
C-6	コンクリート, 0.3MPaO ₃ +紫外線, 1-2分	10.6	11.0	116.6	29.2	
C-7	硫安処理コンクリート, 0.3MPaO ₃ +紫外線, 0-1分	10.4	11.0	114.4	28.6	53.6
C-8	硫安処理コンクリート, 0.3MPaO ₃ +紫外線, 1-2分	10.2	9.8	100.0	25.0	
C-9	コンクリート, 8.8MPa水道水, 0-1分	9.6	3.8	36.5	9.1	11.3
C-10	コンクリート, 8.8MPa水道水, 1-2分	9.8	0.9	8.8	2.2	
C-11	硫安処理コンクリート, 8.8MPa水道水, 0-1分	9.6	3.7	35.5	8.9	11.5
C-12	硫安処理コンクリート, 8.8MPa水道水, 1-2分	9.6	1.1	10.6	2.6	

25cm×25cmのコンクリート片を0.3MPaモルクラスターオゾン水で洗浄したときの除染率は2分間で約60%であった。また、硫酸アンモニウムで前処理したとき、および紫外線を照射したときの除染率の向上は約10%であった。

0～1分の溶出率と1～2分の溶出率との比をみると、1～2分でも0～1分の60～90%の割合で溶出しており、オゾンによる酸化反応でゆっくりと化学的に溶出されていることが示唆された。

一方で、8.8MPaの水道水による溶出率は11%程度であった。0～1分の溶出率と1～2分の溶出率との比をみると、1～2分の溶出率は0～1分の24～29%であり、削れやすい表面が切削されたあとは、深部の硬い層にセシウムが存在し、水の打撃力だけでは溶出率が高まらないのではないかと考えられた。

表2 コンクリートからの主成分の溶出

試料No.	試料	溶出濃度(ppm)			
		Na	K	Ca	Mg
AA	コンクリート, 0.3MPaO ₃ , 0-1分	12.7	0.8	12.9	2.7
AC	コンクリート, 0.3MPaO ₃ , 1-2分	12.3	0.8	12.6	2.7

0.3Mpaモルクラスターオゾン水で洗浄したときの、コンクリート主成分の分析結果(表2)をみると、洗浄0～1分と1～2分がほぼ同じであり、モルクラスターオゾン水がコンクリートを均一に溶解していることが明らかとなった。

表3. アスファルト面の洗浄試験

試料No.	試料	試料容量(L)	Cs濃度(ppb)	Cs溶出量(μg)	Cs溶出率(%)	溶出率合計(%)
A-1	アスファルト, 0.3MPaO ₃ , 0-1分	10.6	15.0	159.0	39.8	66.0
A-2	アスファルト, 0.3MPaO ₃ , 1-2分	10.6	9.9	104.9	26.2	
A-3	アスファルト, 0.3MPaO ₃ +紫外線, 0-1分	10.8	16.0	172.8	43.2	80.3
A-4	アスファルト, 0.3MPaO ₃ +紫外線, 1-2分	10.6	14.0	148.4	37.1	
A-5	アスファルト, 8.8MPa水道水, 0-1分	9.6	3.2	30.7	7.7	13.7
A-6	アスファルト, 8.8MPa水道水, 1-2分	9.6	2.5	24.0	6.0	

30cm×30cmのアスファルト片を0.3MPaモルクラスターオゾン水で洗浄したときの除染率は2分間で66%であった。また、紫外線を照射したときの除染率の向上は約15%であった。

0～1分の溶出率と1～2分の溶出率との比をみると、1～2分でも0～1分の65～85%の割合で溶出しており、コンクリートと同様にオゾンによる酸化反応でセシウムが化学的に溶出されていることが示唆された。

一方で、8.8MPaの水道水による溶出率は13.7%となり、モルクラスターオゾン水で洗浄した場合の1/5であった。

2. フィールド試験

3.1 フィールド試験 1 郡山

3.1.1 試験計画

日程 平成 23 年 12 月 15 日-12 月 18 日

場所 福島県郡山市工場敷地内

除染対象物

建屋壁面下部 50cm (コンクリート)

側溝脇玉砂利 (岩石)

側溝脇の地面 (土壌)

側溝 (コンクリート)

洗浄装置 ネイチャーズ株式会社製車載型モルクラスターオゾン水生成装置

測定日 (12 月 16 日)

試験方法

12 月 15 日に線量率を評価する地点を決め、16 日に各評価地点の 1cm 表面線量率を鉛ブロックで遮蔽した GM サーベイメーターまたは CsI(Tl)シンチレーションサーベイメーターを用いて測定し、線量率マップを作成した。

洗浄方法

除染は基本的に地表面から高い地点から低い地点に向けて行います。したがって、建屋壁面下部→側溝脇玉砂利→側溝脇の地面→側溝の順に進めた。

建屋壁面下部・玉砂利面 (12 月 17 日)

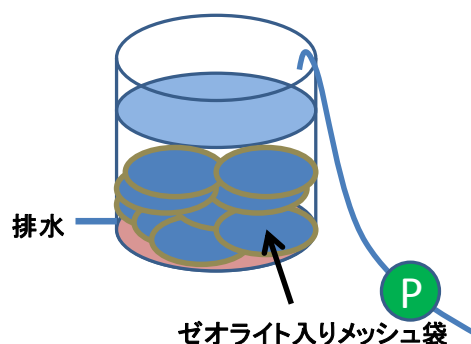
- ① 方向 10m ごとに区切りをつけ、玉砂利面に遮水板を設置した。
- ② 溝に 10m の幅で土嚢を配置し、ポンプで側溝にオーバーフローした排水を排水処理装置にくみ上げられるようにした。(排水の処理に記載の図)
- ③ 屋壁面にオゾン水を散水する。壁面の上部から下部方向へ洗浄した。
- ④ 溝にオーバーフローできず、玉砂利面に溜まる洗浄水は随時掃除機で吸引し、U字側溝に流し入れた。
- ⑤ 面を洗浄し終わったら、引き続き玉砂利面にオゾン水を散水した。
- ⑥ 砂利面にたまった洗浄水は掃除機で吸引し、側溝に流し入れた。
- ⑦ 各評価地点の 1cm 表面線量率を測定した。
- ⑧ ①から⑦の作業を 2 回 (100m) 繰り返した。

地面・側溝（12月18日）

- ① 土壌面にオゾン水を散布する。高い地点から低い地点に向けてオゾン水を散布し、水が溜まった地点では随時掃除機で吸引し、U字側溝に流し入れた。
- ② の作業を100mの区間において2回実施した。
- ③ 透に時間がかかるため測定は側溝を洗浄後に行った。
- ④ 側溝に10mの幅で土嚢を配置し、ポンプで7. に示す排水処理装置に排水をくみ上げられるようにした。
- ④ に側溝の横面を洗浄し、その後、底面を洗浄した。
- ⑤ 各評価地点の1cm表面線量率を測定した。

排水の処理

側溝に溜まった排水および掃除機で吸引した排水は、土壌粒子を捕捉するフィルターとセシウムを吸着するゼオライトから成る浄水装置でセシウムを除去した後に、側溝の下流部に放流した。



洗浄水浄化装置の概要案

作業工程

	12月16日	12月17日	12月18日
現場確認	→		
線量率測定	→		
壁面洗浄		→	
玉砂利洗浄		→	
地面洗浄			→
側溝洗浄			→

3.1.2 郡山市工場除染試験および空間線量率測定結果

除染対象物・対象場所

建物壁面，玉砂利面，側溝，側溝脇土壌（測定地点は図を参照ください）

測定機器

CsI(Tl)シンチレーションサーベイメーター

独立行政法人日本原子力研究機構貸与装置（1年以内に校正したもの）
厚さ 50～100mm の鉛遮蔽体を用いた。

GM サーベイメーター

東京都市大学貸与装置（1年以内に校正したもの）
厚さ 30mm（部分的に 50mm）の鉛遮蔽体を用いた。

測定結果概要

1m 空間線量率（鉛遮蔽体を用いない）は 13～57%低減させることができた。
高線量箇所（別紙測定地点図 A.B.K 地点）では、モルクラスターオゾン水で 5 回反復洗浄することにより低減効果が高まることを確認した。

1m 空間線量率は周辺環境の影響を強く受けて平均化されることから、測定ポイントの周囲が構造物で仕切られている場所（K 地点など）で、測定結果が顕著に表れる傾向があった。

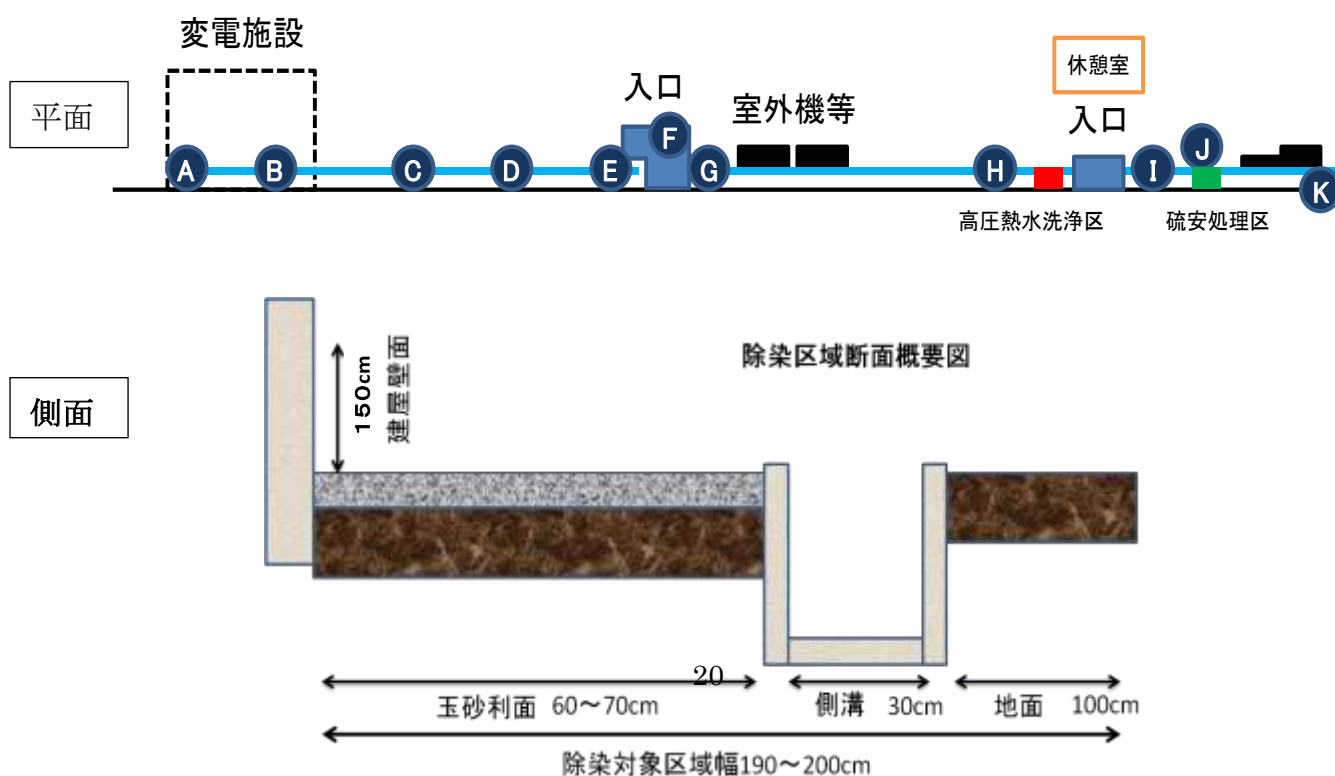
建屋壁面では、表面線量率（50mm 厚鉛遮蔽体を用いた／以下同じ）で 62～88%と顕著な除染効果が認められた。

玉砂利面では、平均 70%以上の除染率が得られた。

側溝については、70%以上の除染率が得られたものの、翌日再計測したとき、一部の地点で降雨や融雪等により土壌成分（泥）の流入が認められ、線量の増加が確認された。

土壌面（地面と記載）は、粘土質であったため、顕著な除染効果が認められなかった。

測定地点図



1m空間線量率/遮蔽体を用いず計測

地点	線量率(μ Sv/h)		低減率(Δ %)	備考
	除染前	除染後		
A	2.95	1.84	38	高線量率地点のため5回反復洗浄
B	3.69	2.21	40	高線量率地点のため5回反復洗浄
C	2.36	2.00	15	
D	2.34	1.91	19	
E	2.53	1.99	21	
F	1.21	0.96	21	出入口, コンクリート面が多い
G	2.03	1.69	17	
H	1.97	1.70	13	高圧熱水洗浄→モルクラオゾン水洗浄
I	2.18	1.89	13	
J	2.04	1.71	16	前処理を施したうえで洗浄
K	3.70	1.58	57	高線量率地点のため5回反復洗浄

建屋壁面/50mm厚遮蔽体を用いて計測

地点	計数率または線量率			除染率(Δ%)	備考
	除染前	除染後	単位		
A	8.5	3.2	cps	62	
A	4.0	1.1	cps	73	
B	12.5	3.2	cps	74	
B	14.2	2.3	cps	84	
C	10.0	3.1	cps	69	
D	7.1	2.1	cps	70	
E	7.0	1.8	cps	74	
F	NT	NT			出入口のため壁面の洗浄はできなかった
G	0.12	0.03	μ Sv/h	72	
H	0.13	0.04	μ Sv/h	71	高圧熱水洗浄後の壁面をモルクラオゾン水で洗浄
I	0.31	0.06	μ Sv/h	81	
J	0.42	0.05	μ Sv/h	88	
K	2.33	0.40	μ Sv/h	83	
NT:測定せず					
ご参考	0.18	0.13	μ Sv/h	27	高圧熱水洗浄/水道水, 85°C, 200MPa

玉砂利面/50mm厚遮蔽体を用いて計測

地点	計数率または線量率			除染率(△%)	備考
	除染前	除染後	単位		
A	95.0	26.0	cps	73	
A	55.0	25.0	cps	55	泥が溜まったが排水できず
A	80.0	27.0	cps	66	
A	40.0	9.0	cps	78	
B	22.40	6.21	μ Sv/h	72	
B	60.0	18.0	cps	70	
B	62.0	18.0	cps	71	
C	18.21	3.74	μ Sv/h	79	
C	48.0	14.0	cps	71	
D	42.0	16.0	cps	62	
E	42.0	12.0	cps	71	
F	NT	NT			出入口で玉砂利はなし
G	4.92	3.00	μ Sv/h	39	砂利面洗浄後に建屋壁面を大規模に洗浄
H	5.33	2.62	μ Sv/h	51	高圧熱水洗浄後のモルクラオゾン水洗浄1回目
H	5.33	2.12	μ Sv/h	60	高圧熱水洗浄後のモルクラオゾン水洗浄2回目
I	9.97	2.66	μ Sv/h	73	
J	12.41	3.24	μ Sv/h	74	モルクラオゾン水洗浄1回目
J	12.41	1.92	μ Sv/h	85	モルクラオゾン水洗浄2回目
K	18.77	4.59	μ Sv/h	76	
NT:測定せず					
ご参考	4.78	5.33	μ Sv/h	0	高圧熱水洗浄/水道水, 85°C, 200MPa

側溝/50mm厚遮蔽体を用いて計測

地点	計数率または線量率			除染率(%)	備考
	除染前	除染後	単位		
A	8.0	2.1	cps	74	側溝底面
A	8.0	2.2	cps	73	側溝底面
A	20.0	8.1	cps	60	側溝底面, 洗浄前に泥だまり有り
A	0.82	0.42	μ Sv/h	49	側溝底面をモルクラオゾン水で1回洗浄
A	0.82	0.11	μ Sv/h	87	側溝底面をモルクラオゾン水で2回洗浄
A	4.35	1.22	μ Sv/h	72	側溝側面をモルクラオゾン水で1回洗浄
A	4.35	0.81	μ Sv/h	81	側溝側面をモルクラオゾン水で2回洗浄
B	3.3	1.0	cps	70	側溝底面
B	3.3	1.0	cps	70	側溝底面
C	6.0	NT	cps		側溝底面, 屋根からの落水で水が溜まり, 洗浄後は測定できず
D	7.0	NT	cps		側溝底面, 屋根からの落水で水が溜まり, 洗浄後は測定できず
E	14.0	NT	cps		側溝底面, 屋根からの落水で水が溜まり, 洗浄後は測定できず
F	NT	NT			側溝なし
G	0.74	NT	μ Sv/h		屋根からの落水で水が溜まり, 洗浄後は測定できず
H	0.82	0.29	μ Sv/h	64	高圧熱水洗浄後の側溝側面をモルクラオゾン水で洗浄
H	0.56	0.21	μ Sv/h	62	側溝側面
I	0.99	NT	μ Sv/h		屋根からの落水で水が溜まり, 洗浄後は測定できず
J	1.32	0.21	μ Sv/h	84	側溝側面
K	4.55	1.14	μ Sv/h	75	洗浄前に泥だまり有り, 洗浄後も少量の泥だまり有り

NT:測定せず

土壌面/50mm厚遮蔽体を用いて計測

地点	計数率または線量率			除染率(△%)	備考
	除染前	除染後	単位		
A	NT	NT			土壌面なし
B	4.5	4.4	cps	2	
B	4.6	4.4	cps	4	
C	4.6	4.7	cps	0	排水できず泥だまりになった
D	4.6	4.4	cps	4	
E	4.8	4.8	cps	0	排水できず泥だまりになった
F	NT	NT			土壌面なし
G	NT	NT			広い土壌面なし
H	NT	NT			
I	2.02	1.93	μ Sv/h	5	
J	2.67	2.87	μ Sv/h	0	排水できず泥だまりになった
K	NT	NT			土壌面なし

NT:測定せず

3.2 フィールド試験 2

日程 平成 23 年 12 月 19 日～21 日

場所 福島県双葉郡浪江町赤宇木

除染対象物・対象場所

アスファルト面 (3 種類), 広域アスファルト面, 道路法面, 樹木

洗浄装置 ネイチャーズ株式会社製車載型モルクラスターオゾン水生成装置

測定機器

CsI(Tl)シンチレーションサーベイメーター

独立行政法人日本原子力研究機構貸与装置 (1 年以内に校正したもの)

表面線量率を測定する場合は厚さ 50～100mm の鉛遮蔽体を用いた。

実験方法

3.2.1 「8.8MPa 水道水」「0.3MPa モルクラスターオゾン水」による除染効果の比較実験

- ① 1 区あたり 1m×1m とする (アスファルト 3 区, コンクリート 3 区)。
- ② 各区の表面汚染密度を鉛遮蔽体で外部からの放射線を遮断し, シンチレーションカウンターで測定した。
- ③ アスファルトおよびコンクリートに 0.5, 1, 2, 4, 8 分間, 8.8MPa 水道水または 0.3MPa オゾン水を散水しながら, 表面汚染密度の変化を記録した。
この実験により除染効果と単位面積あたりの必要処理時間を算出した。

3.2.2 「0.3MPa モルクラスターオゾン水」による広域除染と空間線量率への寄与率を把握する実験

- ① 駐車場全面 (120m²), 道路路面 (300m²), 道路法面 (210m²) を除染し, 除染エリア各地点での 100cm 空間線量率 (一部 10cm, 50cm も測定) をシンチレーションカウンターで計測した。
- ② 0.3MPa モルクラスターオゾン水で当該エリア全面を洗浄し, 洗浄面の表面線量率を正確に計測した。
- ③ 洗浄後, 各空間線量率を計測し, 表面汚染の除染率と空間線量率の低減率と

の関係性を確認した。

3.2.3 樹皮の除染実験

- ① 表面汚染密度が高い樹木をモニタリングして見つけ出し、その中でも濃度が高いポイントを選定した。
- ② 0.3MPa オゾン水を2, 4, 8分間散水し、その間の表面汚染密度をシンチレーションカウンターで計測して記録した。
- ③ 8.8MPa 水道水による高圧洗浄でも②と同様の実験を行い、オゾン水の除染率と比較した（②と③は水量を同一とし、水圧が1:30での条件）。

3.2.4 土壌の除染実験

- ① 土壌面に長さ200mm、直径50mmのカラムを打ち込んだ。
- ② 0.3MPa オゾン水を表面に一定量散水した。
- ③ 2時間以上経過後にカラムを抜き取った。
- ④ U-8容器に土壌を移し、ガンマ線スペクトロメトリーで分析する。
※②の実施水量は1m³あたり10Lとし、法面土壌に対し均等に散布した。

【測定結果】

アスファルト 1

アスファルト1は骨材が砂状であり、いわゆる仕上げ舗装面であった。

高圧水で洗浄した場合、路面表面の有機質の汚れおよび雲母質様の骨材が路面から削り取られ、洗浄水とともに流れていく様子が観察された。高圧水洗浄では約15分で除染率が下げ止まり、除染率は約59%であった。

一方、モルクラオゾン水で洗浄した場合は、路面表面の有機質の汚れは溶出除去されたものの、高圧水洗浄の場合のように骨材が削り取られることはなかった。3分間の洗浄で約70%除染することができた。

アスファルト 2

アスファルト2は骨材が砂利状であり一般的な道路面であった。

高圧水洗浄でも骨材が削り取られる様子は観察されなかった。高圧水による洗浄では約10分で除染率が下げ止まり、除染率は約20%であった。

一方、モルクラオゾン水で洗浄した場合は0.5分間で約65%、6分間洗浄で約73%除染することができ、高圧水洗浄と大きな差がみられた。

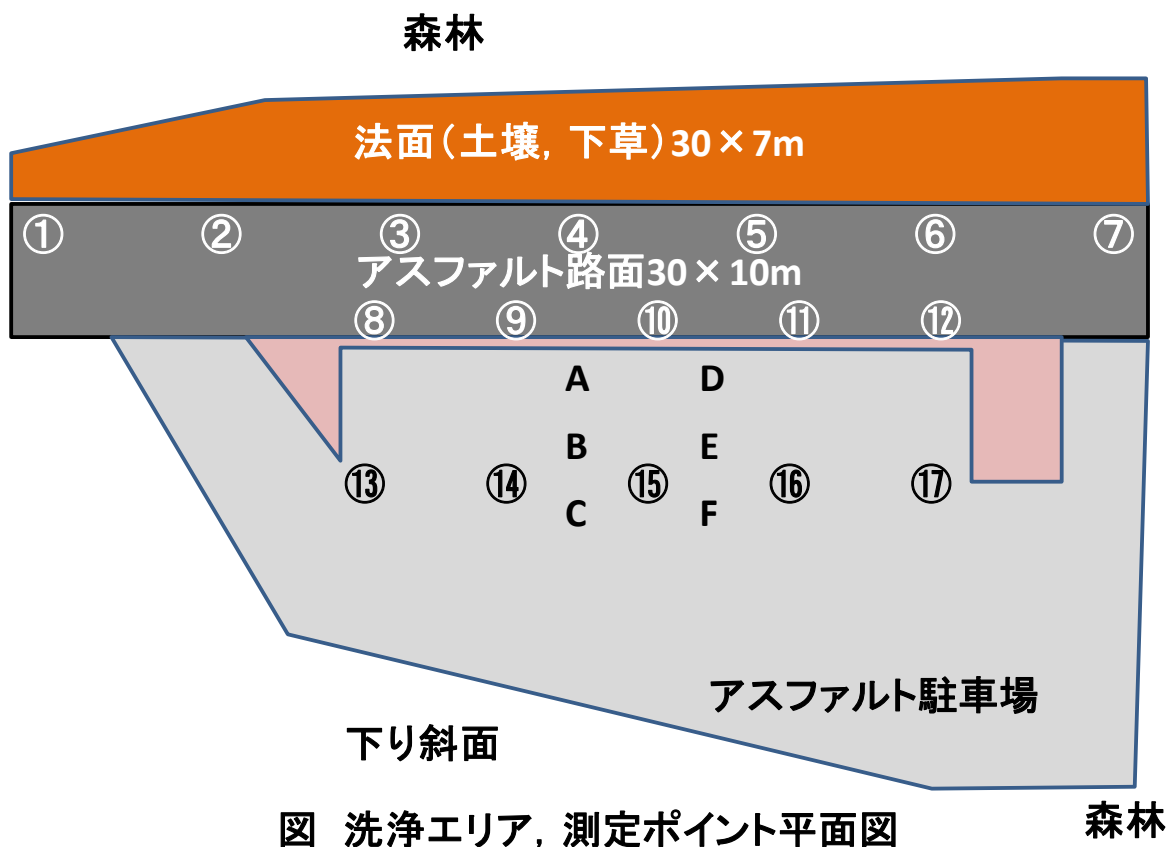
アスファルト 3

アスファルト 3 は骨材が多くタール分が少ない透水性の路面であった。

高圧水による洗浄では 15 分で除染率が約 9%であったが 20 分洗浄すると路面に水があふれるようになり、除染率は約 2%まで減少した。

一方、モルクラオゾン水で洗浄した場合は 0.5 分間で約 30%の除染率が得られ、3 分後には約 34%となった。しかし、4 分洗浄すると路面に水があふれるようになり、除染率は約 20%まで減少した。透水性の路面は透水力が飽和状態になると、一度除去したセシウムが路面に再浮遊して線量率が上昇するものと考えられた。

※モルクラオゾン水と高圧水道水洗浄を比較するため、水量条件を同一にして、洗浄時間を調整した (10 : 1)。



アスファルト1		
骨材が砂状で高圧洗浄で雲母系の細砂がはぎとられる様子が観察された		
高圧水洗浄 : 8.8MPa, 6L/min, 1m × 1mエリア		
洗浄後時間(分)	線量率(μ Sv/h)	除染率(Δ%)
0	2.555	
5	1.255	50.9
10	1.144	55.2
15	1.098	57.0
20	1.060	58.5
モルクラオゾン水洗浄 : 0.3MPa, 60L/min, 1m × 1mエリア		
洗浄後時間(分)	線量率(μ Sv/h)	除染率(Δ%)
0	2.316	
0.5	1.447	37.5
1	1.193	48.5
1.5	1.052	54.6
2	1.028	55.6
3	0.707	69.5
4	0.725	68.7

アスファルト2

骨材が砂利で高圧洗浄でも骨材がはぎとられる様子は観察されない

高圧水洗浄: 8.8MPa, 6L/min, 1m×1mエリア

洗浄後時間(分)	線量率(μ Sv/h)	除染率(Δ %)
0	2.048	
5	1.809	11.7
10	1.663	18.8
15	1.586	22.6
20	1.602	21.8

モルクラオゾン水洗浄: 0.3MPa, 60L/min, 1m×1mエリア

洗浄後時間(分)	線量率(μ Sv/h)	除染率(Δ %)
0	2.520	
0.5	0.886	64.8
1	1.008	60.0
1.5	0.818	67.5
2	0.848	66.3
3	0.85	66.3
4	0.823	67.3
6	0.682	72.9

アスファルト3			
骨材が砂利状で透水性			
高圧水洗浄 : 8.8MPa, 6L/min, 1m × 1mエリア			
洗浄後時間(分)	線量率(μ Sv/h)	除染率(Δ %)	
0	3.874		
5	4.046	-4.4	
10	4.017	-3.7	
15	3.539	8.6	
20	3.805	1.8	
モルクラオゾン水洗浄 : 0.3MPa, 60L/min, 1m × 1mエリア			
洗浄後時間(分)	線量率(μ Sv/h)	除染率(Δ %)	
0	4.538		
0.5	3.269	28.0	
1	3.248	28.4	
1.5	3.203	29.4	
2	3.315	27.0	
3	3.005	33.8	
4	3.662	19.3	

広域アスファルト面の除染実験

駐車場内の 20m×6m のエリアをモルクラオゾン水 (0.3MPa, 60L/min) で 40 分間洗浄した。測定は図の A~F 地点で行い, 0.1m, 0.5m, 1m の空間線量率と遮蔽体を路面側に向けてコリメートした 0.1m, 0.5m, 1m の空間線量率を測定した。

1m 空間線量率の低減率は洗浄していない場所からの放射線の影響も受けるため洗浄面中央付近で約 20%であった。特に洗浄していないエリアに近い地点では約 8~14%の低減率であった。一方で遮蔽体で路面方向にコリメートした場合の 10cm 空間線量率は路面の洗浄状態を反映して約 32~36%と地点ごとの計測値に差が見られなかった。

道路法面および路面の除染実験

30m×7m の道路法面 (草の生えた土壌), 30m×10m の道路面 (アスファルト), 20m×6m の駐車場路面 (アスファルト) をモルクラオゾン水 (0.3MPa, 60L/min) で洗浄した。測定は図の①~⑰地点で行い, 1m の空間線量率と遮蔽体を法面側に向けてコリメートした 1m の空間線量率を測定した。

空間線量率は洗浄エリアの中央で最も低減率が大きくなり, その値は約 33%であった。また, コリメートした場合の空間線量率をみると洗浄エリアの中央付近で, ④で 24%, ⑨で 29%, ⑭で 36%と順次低減率が増えてきており, 空間線量率が測定地点へ入射する放射線の積算値であることが確認できた。

※洗浄エリア中央の位置に対して道路法面の占める割合は (45° : 360°) 程度であり, 空間線量率の低下寄与率が大きいと認識された。

アスファルト(広域洗浄)

骨材が砂状で高圧洗浄で雲母系の細砂がはぎとられる様子が観察された

モルクラオゾン水洗浄:0.3MPa, 60L/min, 縦5m×横15mエリア, 測定地点は横15mの中央

測定位置	測定地上高さ	遮蔽体なし				遮蔽体あり(地表面方向にコロメート)			
		空間線量率(μ Sv/h)		低減率 (%)	空間線量率(μ Sv/h)		低減率 (%)		
		洗浄前	洗浄後		洗浄前	洗浄後			
道路から4m地点	100cm	5.044	4.624	8.3	1.971	1.443	26.8		
	50cm	5.399	4.896	9.3	2.111	1.490	29.4		
	10cm	7.048	6.054	14.1	2.234	1.513	32.3		
道路から2m地点	100cm	5.197	4.387	15.6	2.022	1.387	31.4		
	50cm	5.564	4.488	19.3	2.228	1.498	32.8		
	10cm	7.510	5.942	20.9	2.338	1.554	33.5		
道路から0.5m地点	100cm	5.539	4.788	13.6	2.271	1.452	36.1		
	50cm	5.467	4.889	10.6	2.249	1.441	35.9		
	10cm	6.569	5.585	15.0	2.140	1.367	36.1		

道路・道路法面(広域洗浄)

遮蔽なし1m空間線量率

地点	①		②		③		④		⑤		⑥		⑦	
	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後
1m空間線量率 (μ Sv/h)	9.178	7.618	8.466	6.503	7.762	5.873	7.495	5.697	7.040	5.418	7.078	5.509	7.064	6.102
低減率(%)	17.0		23.2		24.3		24.0		23.0		22.2		13.6	

地点	⑧		⑨		⑩		⑪		⑫	
	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後
1m空間線量率 (μ Sv/h)	6.610	4.934	5.889	4.561	6.010	4.041	6.754	5.066	5.784	5.031
低減率(%)	25.4		22.6		32.8		25.0		13.0	

地点	⑬		⑭		⑮		⑯		⑰	
	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後
1m空間線量率 (μ Sv/h)	5.914	4.438	5.760	4.622	5.753	4.320	5.780	4.528	6.165	4.816
低減率(%)	25.0		19.8		24.9		21.7		21.9	

遮蔽体あり法面向きコリメート1m空間線量率

地点	①		②		③		④		⑤		⑥		⑦	
	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後
1m空間線量率 (μ Sv/h)	1.886	1.576	1.661	1.294	1.722	1.261	1.582	1.197	1.431	1.035	1.432	1.094	1.409	1.120
低減率(%)	16.4		22.1		26.8		24.3		27.7		23.6		20.5	

地点	⑧		⑨		⑩		⑪		⑫	
	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後
1m空間線量率 (μ Sv/h)	1.740	1.130	1.536	1.089	1.403	1.015	1.364	0.973	1.338	0.927
低減率(%)	35.1		29.1		27.7		28.7		30.7	

地点	⑬		⑭		⑮		⑯		⑰	
	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後	洗浄前	洗浄後
1m空間線量率 (μ Sv/h)	1.696	1.255	1.514	0.965	1.468	1.030	1.469	1.044	1.300	1.038
低減率(%)	26.0		36.3		29.8		28.9		20.2	

樹木の除染実験

高圧水(水道水)で洗浄した場合、約2~20%表面線量率が上昇してしまった。これは、セシウムが樹皮の内側に浸透しており、8.8MPaの高圧で表皮が剥がれた結果、セシウムが沈着している面が露出したためであると考えられた。また、セシウムは水道水では溶出しないことも確認された。

一方で、モルクラオゾン水で洗浄した場合は吐出圧力が0.3MPaであることから高圧水のように表皮が著しく剥がれることはなかったが、約30~60%の除染率を得ることができた。これは、樹皮(有機物)と結合しているセシウムを酸化分解反応で化学的に溶出させているものと考えられた。また、表層の樹皮から内分浸透する超高濃度モルクラオゾン水が、内部のセシウムを溶かし出して、再度内部から外部へと流し出している現象によるものと推察された。

※本実験では条件を統一するため、モルクラオゾン水の散水量を6L/minとしたが、水量を増やすことで効率のみならず除染率も高められる可能性がある(オゾンの酸化分解反応の特性では、短時間内に多く散水した方が効果的である)。

樹木			
高圧水洗浄: 8.8MPa, 6L/min, 3分, 0.3m × 0.3mエリア			
樹木種	線量率(μ Sv/h)		除染率 (△%)
	洗浄前	洗浄後	
広葉樹(ナラ)	4.000	4.058	-1.5
広葉樹(ブナ)	2.288	2.626	-14.8
針葉樹(マツ)	3.679	4.392	-19.4
針葉樹(マツ)	4.900	5.498	-12.2
モルクラオゾン水洗浄: 0.3MPa, 60L/min, 3分, 0.3m × 0.3mエリア			
樹木種	線量率(μ Sv/h)		除染率 (△%)
	洗浄前	洗浄後	
広葉樹(ナラ)	4.177	2.375	43.1
広葉樹(ブナ)	3.116	1.600	48.7
針葉樹(マツ)	4.261	2.473	42.0
針葉樹(マツ)	4.801	3.439	28.4

3.3 フィールド試験3

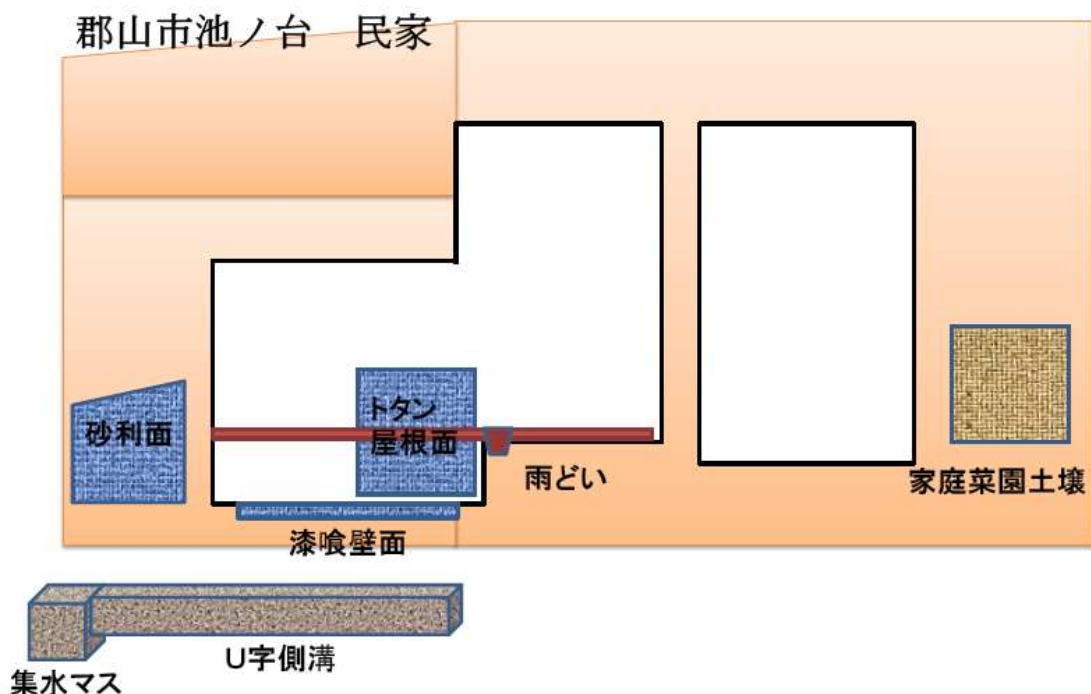
日程 平成24年3月14日

場所 福島県郡山市池ノ台5丁目

除染対象物・対象場所

民家2棟（建物面積：A棟約80㎡、B棟70㎡）のトタン製屋根面、雨どい、漆喰壁面、トタン製戸袋と、敷地内の碎石砂利面、家庭菜園土壌面、敷地に隣接するコンクリート製U字側溝および集水マスを対象物として除染した。

現地配置レイアウト図



地域線量

福島県郡山市内の市街地で線量率が最も高い地域とされる池ノ台でモルクラスターオゾン水による住居への除染効果を実証した。

洗浄装置

ネイチャーズ株式会社製車載型モルクラスターオゾン水生成装置

計測装置および計測

日立アロカメディカ NaIシンチレーションサーベイメーター (TCS172)
日立アロカメディカ GMサーベイメーター (SURVEY MATER TGS146)

放射線取扱主任者が実施し、計測方法は国・福島県で定められたガイドラインに定められた方法測定した。

NaIシンチレーションサーベイメーターおよびGMカウンターの2種類の計測器により表面線量率および空間線



量率を測定した。筒状鉛製遮蔽体（鉛厚さ20mm）によりコリメートして測定した。

計測ポイントでの測定は、2分間安定化させた後に10秒ごとに5回数値を読み記録して平均数値を測定値とした。

実験方法

3.3.1 「モルクラスターオゾン水による住居および居住環境対象物への除染効果実証実験の概要」

- ① 1区あたり約9㎡（トタン屋根3m×3m、漆喰壁2.7m×4.5m、砕石砂利面3m×3m、家庭菜園土壌面3m×3m、コンクリート製U字側溝幅0.3m×深さ0.5m×長さ9m）を対象として除染実験区とした。

9㎡の実験区をとれない雨どいとトタン製戸袋はモルクラスターオゾン水の散布量を短時間にして他の実験区と同じ単位面積あたりの処理にした。

モルクラスターオゾン水の散水量は1分間あたり45ℓとし、吐出水圧はノズル吐出時に0.3MPaとなるよう調整した。尚、ノズルからは噴角45°、ノズルと対象物の距離は約300mmで洗浄作業を実施した。

- ② 各区の表面汚染密度を鉛遮蔽体で外部からの放射線を遮断し、シンチレーションカウンターで測定した。

同様にGMカウンターでの測定も行い、構造上遮蔽体を用いることができない雨どい以外はコリメートして計測した。

- ③ 安全作業のための除染作業確認事項（自主基準）のマニュアルを遵守して実験は実施して万一にもオゾンガスをヒトが吸引することが無いように配慮するとともに、モルクラスターオゾン水散水により発生するオゾンの周囲に対する環境オゾンガス濃度計測も行った。

3.3.2 トタン製屋根面および雨どいの除染実験

トタン製屋根面を3m×3mで区切り3点をモニタリングして選定した。

モルクラスターオゾン水を毎分 45ℓ でノズルから散水し、9 m² を 3 分で除染した。従って対象面 1 m² あたり 15ℓ のモルクラスターオゾン水で除染した。

ノズルから吐出されるオゾン水が対象面にあたる角度は 45° ノズルと対象面の距離は約 30cm とした。

雨どいの受け口には網袋入りゼオライトを配置して除去されたセシウムを捕捉吸着するように配慮した。

除染後、屋根面が乾燥するのを待ち、GMカウンターで表面線量率を計測した。雨どいはシンチレーションカウンターも併用で計測したが、構造上コリメート無しで実施した。



3.3.3 漆喰壁面およびトタン製戸袋の除染実験

漆喰壁面を高さ 2.7m × 幅 4.5m で区切り 3 点をモニタリングして選定した。

モルクラスターオゾン水を上から下へと順に洗浄し、散水量は毎分 45ℓ、

ノズルと壁面の距離は約 30cm とした。

漆喰壁を洗浄した処理後の水は排水路

へと流れ出たが、排水路内に配置した

水中ポンプで汲み上げてゼオライトを

充填したタンクに一時貯留させ、セシウムが吸着除去された後に下流の下水路へと排水される流路とした。

除染後、壁面が乾燥するのを待ち

GMカウンターで表面線量率を計測した。



3.3.4 砕石砂利面の除染実験

玄関前の砕石を敷いた砂利面を 3m × 3m で区切り 2 点をモニタリングして選定した。

モルクラスターオゾン水を均一に散水して 3 分間砂利面を洗い流すように処理した。処理後下流に流れ出た

オゾン水は、事前に配置した網袋入りのゼオライトと接触して放射性物質を吸着させた後に排水経路に流れさせた。

ゼオライトに接触する前にオゾンは土壌など有機物と瞬間の反応を終えて酸素に戻っていることを確認した。

除染後、砂利面が乾燥するのを待ちシンチレーションカウンターおよびGMカウンターで表面線量率を計測した。

3.3.5 家庭菜園土壌面の除染実験

家庭菜園土壌区は3m×3mとし、モルクラスターオゾン水を3分間（毎分45ℓ）均一に散水した後浸透させ、それを2回（計6分間）実施した。土壌は粘土質で浸透性は悪かったが、土壌区周囲がブロックで囲われていたことから、試験区から外部への処理水の流出は見られず全量が鉛直方向に浸透した。散水完了後、約3時間経過して表土が乾燥した状態を確認して、シンチレーションカウンターおよびGMカウンターで表面線量率を計測した。



3.3.6 コンクリート製U字側溝および集水マスの除染実験

コンクリート製U字側溝および集水マスは、予め水道水で底に沈殿していた土壌を除去してから、処理前の底部の表面線量率を計測した。



モルクラスターオゾン水を上流から下流方向に45°の噴射角度で散水除染し、約3分間で9m間を除染した。

除染後、底部の水が無くなったことを確認してシンチレーションカウンターおよびGMカウンターによる表面線量率の測定を実施した。

3.3.7 安全対策の実施

除染エリアは立入禁止区域とし、防護服やオゾン分解機能を有するマスクを着用した作業担当者以外が近づけないように管理した。

モルクラスターオゾン水の散水除染を



開始する前に、見張り役が除染ポイントの周囲の風向きを確認すると共に、除染作業中は風下（立入禁止区域境界線）の地上 0.5m、1.0m、1.5mの地点でオゾンモニター（荏原実業製 AET030P）を用いて連続的に大気環境中のオゾンガス濃度を測定して監視した。万一、厚生労働省の安全基準である 0.1ppm を継続して上回る場合は作業を中断する作業手順とした。（実験中に中断すべき濃度に到達しなかった。）

3.3.8 除染に関する測定結果

トタン製屋根面および雨どい

トタン製屋根面の除染による表面線量率の減少率は最大 69%と高かった。雨どいは線量が高かったが 90%の減少率となった。原発事故以降 1 年経過して強く結着したセシウムを有効に除染できた結果と思われる。作業効率は、対象面 1 m²あたりの処理水量が 15ℓ、除染処理の時間は 20 秒と短時間であり高い効率で処理が可能であることが確認できた。

対象	計測器	コリメート	処理前	処理後	減少率(%)
トタン屋根A地点	GM	無	1.42 CPM	1.08 CPM	△24.0
	GM	有	0.906 CPM	0.814 CPM	△10.0
トタン屋根B地点	GM	無	0.991 CPM	0.632 CPM	△36.0
	GM	有	0.663 CPM	0.368 CPM	△43.5
トタン屋根C地点	GM	無	1.35 CPM	0.511 CPM	△62.0
	GM	有	0.977 CPM	0.296 CPM	△69.0

対象	計測器	コリメート	処理前	処理後	減少率(%)
雨どい	GM	無	19.4 CPM	1.82 CPM	△90
	NaI	無	13.5 μSv/h	1.14 μSv/h	△91

漆喰壁面およびトタン製戸袋

漆喰壁面 2.7m×4.5m (12.15 m²) に対して毎分 45ℓ×3 分間でモルクラスタ

ーオゾン水を散水して除染した。水量は対象面 1 m²あたり 110と少なかった。表面線量率は最大 37%の減少率となった。

処理前の表面線量率が比較的低い状態であったことが減少率がやや低い結果になったと思われる。

対象	計測器	コリメート	処理前	処理後	減少率(%)
漆喰壁面A地点	GM	無	0.344 CPM	0.337 CPM	△2
	GM	有	0.147 CPM	0.126 CPM	△14
漆喰壁面B地点	GM	無	0.274 CPM	0.226 CPM	△13
	GM	有	0.172 CPM	0.107 CPM	△37
トタン製戸袋	GM	無	0.257 CPM	0.222 CPM	△19
	GM	有	0.132 CPM	0.132 CPM	△0

碎石砂利面

碎石砂利面は 3m×3mの区域を定め、毎分 450×3 分間でモルクラスターオゾン水を散水して除染した。水量は対象面 1 m²あたり 150であった。

対象面は固い土の上に碎石が埋め込まれた状態であり浸透性が殆どなかったために処理水は下流方向に流れたが、網袋入りゼオライトを隙間なく配置してセシウムを捕捉吸着させて処理した。

対象	計測器	コリメート	処理前	処理後	減少率(%)
碎石砂利面A地点	GM	無	1.90 CPM	1.29 CPM	△32
	NaI	無	1.53 μSv/h	1.33 μSv/h	△13
	GM	有	1.16 CPM	0.645 CPM	△43
	NaI	有	1.34 μSv/h	1.16 μSv/h	△13
碎石砂利面B地点	GM	無	2.00 CPM	1.73 CPM	△13
	NaI	無	1.74 μSv/h	1.53 μSv/h	△12
	GM	有	1.06 CPM	0.960 CPM	△9
	NaI	有	1.42 μSv/h	1.32 μSv/h	△7

家庭菜園土壌面

家庭菜園の土壌面は 3m×3mで区切られておりそのまま対象面とした。

対象面は周囲にコンクリートブロックが配置されており、対象面で散水したモルクラスターオゾン水が区外に流れ出すことはなく、土壌中の鉛直方向に浸透した。

モルクラスターオゾン水の処理は毎分 45ℓ、3 分間を 2 回繰り返した。従って対象土壌 1 m²あたり 30ℓの処理であった。

計測作業は土壌表面に水が無くなり、表土が乾燥してから実施した。

表面線量率の減少は、場所によりばらつきはあるものの最大 40%と高い効果を示した。

対象	計測器	コリメート	処理前	処理後	減少率(%)
家庭菜園土壌A地点	GM	無	1.09 CPM	1.07 CPM	△2
	NaI	無	1.50 μSv/h	1.47 μSv/h	△2
	GM	有	1.09 CPM	0.65 CPM	△40
	NaI	有	1.29 μSv/h	1.23 μSv/h	△4
家庭菜園土壌B地点	GM	無	0.879 CPM	0.721 CPM	△18
	NaI	無	1.45 μSv/h	1.45 μSv/h	0
	GM	有	0.505 CPM	0.416 CPM	△17
	NaI	有	1.34 μSv/h	1.31 μSv/h	△2

コンクリート製U字側溝および集水マス

コンクリート製U字側溝および集水マスは比較的新しく内部の汚れはほとんど見られなかったが、モルクラスターオゾン水による除染処理の前に水道水で洗浄した。水道水洗浄の後GMカウンターおよびシンチレーションカウンターで計測し、その後オゾン水除染を実施した。

U字側溝は幅 0.3m×高さ 0.5m×長さ 9.0mであり対象面積として約 7.2 m²であった。

モルクラスターオゾン水は毎分 45ℓで3分間散水し、対象面 1 m²あたり 18.75 ℓであった。

処理水量が少なく、短時間処理であったにもかかわらず、最大 65%の除染ができた。

対象	計測器	コリメート	処理前	処理後	減少率(%)
コンクリート製U字側溝 底部	GM	無	4.82 CPM	1.68 CPM	△65
	NaI	無	1.64 μSv/h	0.75 μSv/h	△54
	GM	有	4.83 CPM	1.08 CPM	△77
	NaI	有	1.07 μSv/h	0.82 μSv/h	△23
コンクリート製集水マス 底部	GM	無	2.32 CPM	0.993 CPM	△57
	NaI	無	1.26 μSv/h	0.55 μSv/h	△56
	GM	有	1.51 CPM	0.864 CPM	△42
	NaI	有	1.22 μSv/h	1.00 μSv/h	△18

3.3.9 安全対策の実施（環境オゾン濃度計測の結果）

モルクラスターオゾン水からのオゾンガス揮発への安全対策として、除染区域を立入禁止とする（オゾン分解マスクを着用した作業員を除く）、環境オゾンモニターにより大気中のオゾンガスを測定して監視する措置を取った。監視するサンプリング位置は地上から0.5m、1.0m、1.5mの3点とし計測器は荏原実業社製 AET-030P を用いた。

実験日の除染時の風速は1.2～1.5m/秒（西風）であったが、オゾンモニターによる測定では除染区域境界線（除染ポイントからの距離が最少7m、最大12m）での連続測定では、0.1ppmを5秒以上こえることは無かった。

実験を終えた後対象建物全体を除染したが、毎分450、連続散水時間30分（1,3500）で除染した際にも同様に環境オゾンガスは0.1ppmを5秒以上こえることは無かった。

3.3.10 結果

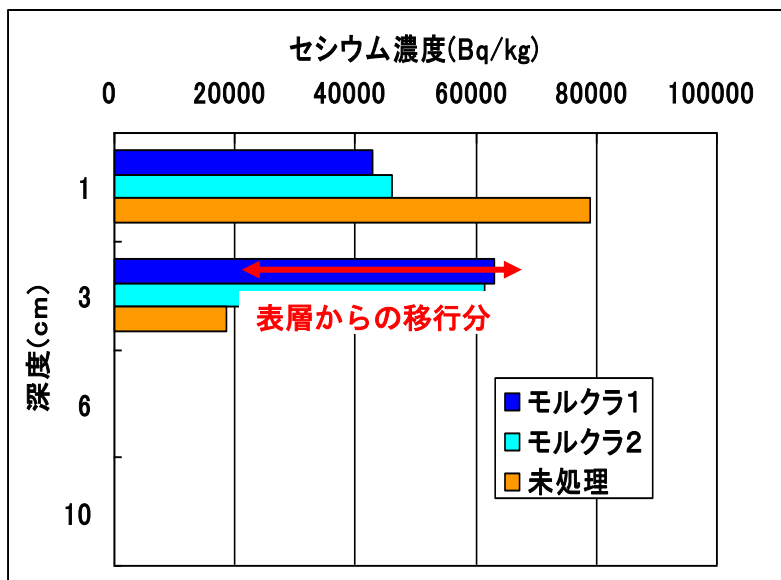
民家の除染作業では少ない処理水量・処理時間で除染効果がだせることが実証できた。実験のために区画を定めた6地点を除染した後に、対象民家は2棟全面（建物面積150㎡、2棟ともに地下1階・地上2階建）を除染し作業効率も高いことを確認した。

4. モルクラスターオゾン水除染に関連する試験

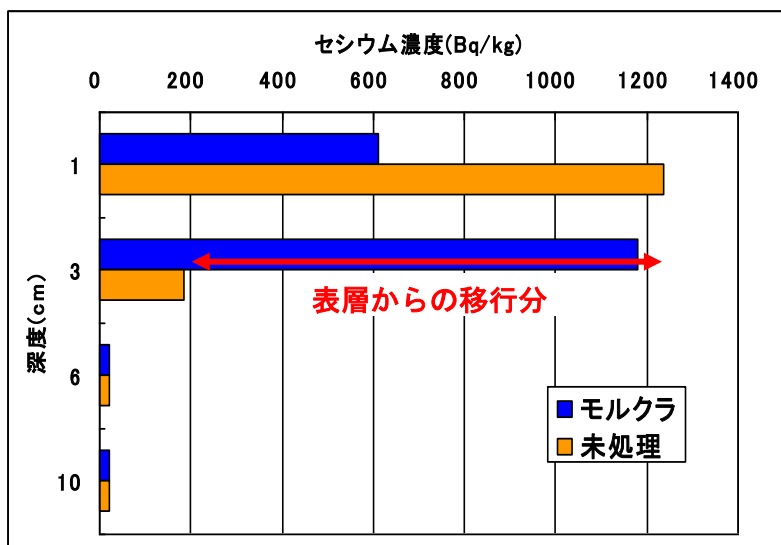
4.1 土壌中でのセシウム移行とセシウム再結着（固定）の確認試験

道路に面した法面の面積 1 m²あたり 10 リットルのモルクラオゾン水を放射状で均一に散布し、予め打ち込んだカラムを採取してセシウムの浸透を確認した。

浪江町 カラム試験結果



西郷村 カラム試験結果



カラム試験で採材したサンプルは、2cm ごと（図では中心位置で表記）に分け、ガンマ線スペクトロメトリーで計測した。（サンプリング場所は、福島県西郷村、福島県浪江町の 2 か所で実施）計測結果では、モルクラオゾン水が、錯体を形成して強固に結着しているセシウムを、一時母材から高い効率で溶かし出し、土壌の鉛直方向に落下浸透する。落下するモルクラオゾン水のオゾンは有機物である土壌成分と接触するから酸素に分解し酸化分解機能を失う、それと同時にセシウムはより下層の土壌に再結着するという想定通りであることを証明する結果が得られた。

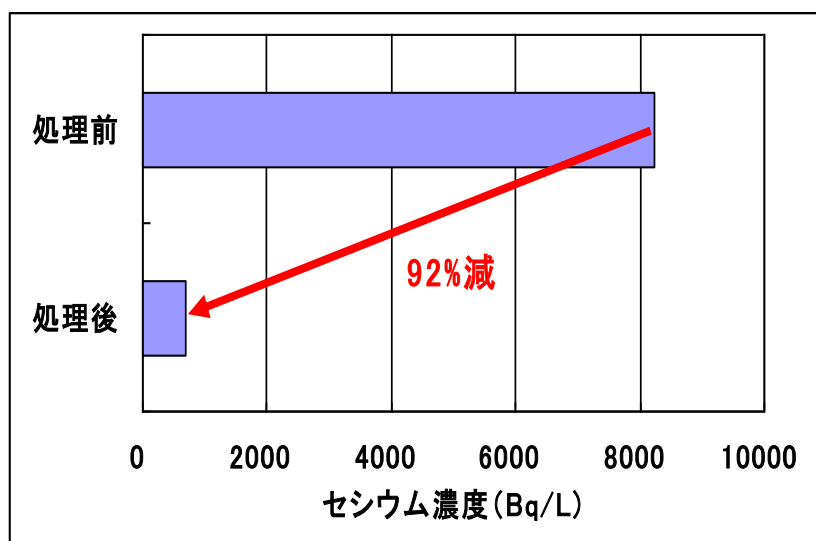
本実験で散布したモルクラオゾン水の水量は僅かであったことから、面積あたりの散水量を増量するとセシウムの移行深度をより深くに制御できるものと考えられる。従って、より放出される放射線量を高い率で減少することが可能である。

また、本実験の結果から、薬剤などで想定される地下水系へのセシウム流出が発生し無いことも確認され、安全であることも確認できた。

4.2 溶出除去された処理水（処理を終えたモルクラオゾン水）からセシウムを捕捉する水処理効果の確認試験

フィールド試験 1 に於いて、建物壁面と玉砂利を洗浄したモルクラオゾン水は、その後流れて U 字側溝に集水した。セシウムを含んだ処理水は、8000Bq/L 程度の放射線量であった。これを排水する以前に、500L 容量のタンクに 400L のゼオライト（網袋に 10L ずつ分包）を入れて接触させてから排水口に流した。ゼオライト吸着処理の前後でのセシウム濃度減少率は、92%であった。

排水処理結果



4.3 モルクラオゾン水除染における安全対策と環境オゾン濃度

当事業を進めるにあたり、オゾンを使う技術として、安全確保のために除染作業確認事項を自主基準として設けた（P.52-53）。

実際のフィールド試験では、環境オゾンガスモニター（荏原実業社製 AET-030P／オゾンガス検知 0.001～1.000ppm）でモルクラオゾン水を散布する周囲環境の大気中オゾンガス濃度を連続的に測定した。

計測時の除染ポイントでの風速は、毎秒2～4m。風の下流方向に5mの地点で、オゾンガスを計測した。モニタリングの高さは、0.5m、1.0m、1.5mであったが、最大0.18ppmと極めて低濃度であり高さによる変化は認められなかった。

環境労働省が労働環境におけるオゾン濃度の上限を0.1ppm以下（1日8時間の平均濃度）としている。今回の計測結果から、除染区域に本来オゾン分解マスクを着用しない人の侵入はしないことから、安全性は保たれる。

尚、除染のためのモルクラオゾン水散水にあたる作業者は、オゾン分解マスクを着用しているが、マスク内でオゾンガスを検知することはなく常に0ppmであった。

従来のオゾン水では、大量にオゾンガスが脱気し危険であったが、モルクラオゾン水では飛躍的に脱気が抑制されることが現場で確認できた。

4.4 除染作業の効率化試験

本事業において、モルクラオゾン水の散布条件を検討し、ノズル形状を10種類以上試し、吐出水圧も調整して高い除染率と効率となる条件を把握した。これまでの高圧洗浄では水の打撃力が効果の有無を左右したが、モルクラオゾン水は高水圧である必要はなく、新鮮なオゾン水がより高濃度のまま除染対象物と接触すればよい。

従って、建屋全部分、道路アスファルト、法面、樹木など、ほとんどの対象物に対して噴射角度45～90°、水圧は0.2～0.5MPa、散水量30～60L／分という条件で、対象面に対して45°程度の傾斜した角度から散水する方法がよいことが分かった。

また、装置1台で時間あたり500㎡以上（平面の場合）の除染が可能であることも確認できた。

5. 総括

酸化分解反応の効果が極めて高く、環境を汚さないモルクラオゾン水で、生活環境の全ての対象物からセシウムを高率で除去することができ、空間線量の大幅削減を、広域で達成できる効果が実証できた。

参考データー

予備試験（参考データ）

1. 日 時

平成 23 年 9 月 23 日－26 日（予備実験）

平成 23 年 9 月 27 日－28 日（本実験）

2. 場 所

福島県内（伊達市，浪江町）

3. 対象構造物

建屋等 建材，ガードレール 等

路面等 コンクリート，アスファルト，レンガ，石材，土壌 等

樹木等 針葉樹，広葉樹，樹皮，堆積腐植 等

4. 洗浄装置

ネイチャーズ株式会社製モルクラスターオゾン水生成装置

ケルヒャー社製高圧洗浄装置

ケルヒャー社製高圧スチーム装置

5. 除染面積

30cm×30cm をマスキングテープあるいはチョークで分けをして，鉛遮蔽体を組んであらかじめ当該区域の表面線量率を測定しておく。

6. 洗浄方法

6. 1 建家・路面（アスファルトを除く）等の洗浄方法

- ① 30cm 角の除染区をマスキングテープで作る。
- ② 遮蔽ブロックを組み，各区の線量を測定し，記録する。
- ③ 「塩化アンモニウム前処理」，「硫酸アンモニウム前処理」区では，噴霧器で各前処理剤を噴霧し，キムタオルを掛け，さらに前処理剤を噴霧してビニールシートで養生して乾燥しないようにする。なお，塩化アンモニウム，硫酸アンモニウムの濃度は飽和濃度である。
- ④ 「コンクリート溶解剤（有機酸）前処理」区では，オゾン水噴霧の 20 分前に処理を施す。なお，コンクリート溶解剤は乾かないように適宜追加噴霧する。
- ⑤ 中圧（0.45MPa）のモルクラスターオゾン水を 1 分～3 分間除染区に噴霧する。対照区として，2 区には「高圧（9MPa）常温水道水」を 1 分間，他の 2

区には「常圧（栓水圧）常温水道水」を1分間噴霧する。

- ⑥ 遮蔽ブロックを組み、各区の線量を測定し、記録する。

6. 2 アスファルト面の洗浄方法

- ① 30cm 角の除染区をマスキングテープで作る。

- ② 遮蔽ブロックを組み、各区の線量を測定し、記録する。

「アスファルト溶解剤前処理」区では、噴霧器で前処理剤を噴霧し、キムタオルを掛け、さらに前処理剤を噴霧してビニールシートで養生する。1時間以上放置する。

- ③ 中圧（0.45MPa）のモルクラスターオゾン水を2分～5分間噴霧する。対照区として、1区には「高圧（9MPa）常温水道水」を1分間、1区には「高温スチーム（100℃）」を5分間噴霧する。

- ④ 遮蔽ブロックを組み、各区の線量を測定し、記録する。

6. 3 樹木等の洗浄方法

- ① 樹木の葉等をジップロックに採取する。

- ② 遮蔽ブロックを組み、各試料の線量を測定し、記録する。

- ③ ザルに試料を入れ、モルクラオゾン水を3分間噴霧する。

- ④ 水気をよくきってからジップロックに移す。

- ⑤ 各試料の線量を測定し、記録する。

7. 測定機器

日立アロカメディカル TSC 171 NaI(Tl)シンチレーションサーベイメーター＋厚さ 2cm 鉛遮蔽体

CLEAR-Gamma A2700 CsI(Tl)シンチレーションサーベイメーター＋厚さ 5cm 鉛遮蔽体

遮蔽後1分以上経過してから数値を読み取る。数値の有効桁数は2桁とする。

8. 結果

コンクリート等（表1参照）

・コンクリート面上に汚染した土壌が載った状態の場合は高圧洗浄等で流出（移動）させることにより線量率を低下させられるが、コンクリートを除染していることにはならない。全体

・コンクリート面の上の土壌を水道水で流したあと、デッキブラシで洗浄しても実質的な除染効果はない。C-12, 13

・表面が粗い敷石を 9MPa の高圧洗浄機で洗浄して初めて 8%弱の除染効果が確認された。しかし、これも細孔に取り込まれた土壌等が洗い流されたものと考えられる。C-14, 15

・コンクリート表面を金属製ブラシで物理的に約 1mm 切削すると表面線量率が 24%低下した。しかしこの作業には労力が必要であり、当然セシウムを含む粉塵も発生する。C-3

・土壌が細孔に入り込んだコンクリート板は前処理を施さなくてもモルクラスターオゾン水の散布だけで 41~49%の除染率を示めすが、この数値には土壌の洗い流し分が含まれる。ちなみに、土壌汚染されていないコンクリートを当該オゾン水のみで洗浄しても除染率は 14~18%である。C-10, 11 vs. C-1, 2

・硫酸アンモニウム、塩化アンモニウム、有機酸による前処理が有効である。除染率は硫酸アンモニウムで前処理した場合が最も高く、前処理時間が 20 時間以上であれば 53~64%である。C-4, 5, 6, 7, 8, 9, 15, 16, 17, 18, 19, 20

・線量率が高い地点で除染試験を行う場合は、厚く、対象構造体と遮蔽体との間および検出器と遮蔽体との間に隙間が生じないように配慮する必要がある。

アスファルト (表 2 参照)

・9MPa 水道水の高圧洗浄、100°Cの高圧スチームの除染効果は実質上認められなかった。もし、他の実験で除染されているとしたら、それはアスファルトの間隙に入り込んだ高度に汚染された土壌が洗い流されているだけであると考えられる。A-7, 8, 9

・アスファルトについてはモルクラスターオゾン水で洗浄することにより、平均 64% (n=9) の除染率が示された。なお、この除染率にはアスファルト面上に載っていた可能性がある土壌の流亡による除染率の上乗せ分はない。

A-1, 2, 3, 4, 5, 10, 11, 12, 13

・アスファルト融解剤も効果があるが、タール分を溶解するため環境を汚染する可能性があり、また、アスファルトの構造が脆くなる。A-6

建材, 土壌等 (表 3 参照)

・建材 (特に側面) の放射線量は空間線量率 (約 1 μ Sv/h, 未掲) と比べ格段に低く (対象家屋の地上 1m の壁面で, 南 0.11, 東 0.13, 北 0.12, 西 0.14 μ Sv/h, 未掲), 洗浄効果は評価できなかった。D-1

・同じ建材 (塗料) で作られた門柱の上部をモルクラスターオゾン水で洗浄することにより, 59%の除染率が得られた。また, 洗浄後, 建材に脱色等の影響は見られなかった。D-2

・人工石材, レンガをモルクラスターオゾン水で洗浄することにより, 50%以

上の除染率が得られた。**D-3, 4**

・建材，レンガ等を 9MPa の水道水で高压洗浄しても除染効果は認められなかった。**D-8, 9**

・室外機やガードレールは金属面であることから除染率が高いものと想定されたが，モルクラスターオゾン水で洗浄することにより目視上非常にきれいになったものの線量の低下は室外機で 46%，ガードレールは 0%であった。定量的な実験ではないが，ガードレールの裏面に鉛ブロックを配置することにより線量率が有意に低下することから，空中に浮いている対象物の除染率を測定するのは難しいのではないかと判断した。したがってガードレールの除染率は参考値とする。**D-5, 6**

・伊達市の土壌は雨どいの受枘直下で $10 \mu \text{Sv/h}$ を超過した (30cm 離しても $10 \mu \text{Sv/h}$ を超過した)，そこで，仮に土壌の表面線量率を $10 \mu \text{Sv/h}$ として除染率を算出すると 48%以上となった。しかし，この場所の土壌は水はけが悪く，一部は当該土壌表面から流亡した可能性もある。一方で実験時間中にオゾン水を完全に浸透させることはできず，土壌表面が湿った状態で測定したが，もし浸透とオゾン水の散水を繰り返し，さらに乾燥されることができれば除染率の向上も図れるものと考えられる。**D-7**

樹木等 (表 3 参照)

・松葉の線量率が高いが，広葉樹 (クヌギ，カエデ) の線量率は松葉の約 1/10 であった。**D-11, 13**

・下草に多い笹の葉は $0.2 \mu \text{Sv/h}$ 程度と低く，洗浄しても変わらなかった。**未掲**

・松の樹皮の線量率も高かった。松葉に捕捉されたセシウムが雨水とともに枝，幹を伝わって流下しているものと推測される。**D-14**

・針葉樹の幹近くの堆積腐植の線量率は $10 \mu \text{Sv/h}$ を超過していたが，そのすぐ下層の土壌の線量率は $6.2 \mu \text{Sv/h}$ であった。**D-15, 16**

・森林内の線量率 ($>30 \mu \text{Sv/h}$ ，**未掲**) は，道路や駐車場 ($10 \mu \text{Sv/h}$ ，**未掲**) よりも数倍高かった。森がセシウムのリザーバーになっていることが示唆される結果であった。森林の洗浄は重要な課題である。

・森林の土壌など，団粒構造が高度に発達しており，水が浸透しやすい場所ではモルクラスターオゾン水がよく浸透するため，除染率も約 70%と高くなった。

D-10, 15

・線量率の高い松葉をモルクラスターオゾン水で洗浄したところ，3 分後の除染率は 48%，また，洗浄した松葉を翌日まで保存し，キムタオルで水分を吸収させてから測定したところ除染率は 61%であった。なお，松葉に目視上の変化は

認められなかった。**D-11, 12**

・松の樹皮も洗浄したが、樹皮の層の間に水分が残ってしまい除染率は約 40%にとどまった。さらにモルクラスターオゾン水の散布量を多くするか、モルクラスターオゾン水で洗浄した後に井戸水・水道水等でリンスすればさらに除染できるものとする。 **D-14**

・堆積腐植は洗浄効率が高く、初期線量率が $10 \mu \text{Sv/h}$ を超えているため、仮に $10 \mu \text{Sv/h}$ として計算しても 68%以上になる。堆積腐植層の下部の土壌も同じ傾向を示した。フミン等の腐植成分にセシウムが取り込まれて形成されている有機錯体は、オゾン水で分解しやすいものと考えられる。また、森林内土壌は間隙が大きいので、放射能濃度が高い細かい粒子成分がオゾン水とともに下方移流しやすいものと考えられる。 **D-15, 16**

表1 コンクリート等(20検体)

No.	地域名	対象場所	前処理	洗浄水	線量率(μ Sv/h)		除染率 (%)	備考
					洗浄前	洗浄後		
C-1	伊達市	ブロック塀上面	なし	モルクラスタ- オンゾク水	0.76	0.65	14	単に噴霧しただけでは高い除染率は得られない
C-2		ブロック塀上面	なし		0.87	0.71	18	単に噴霧しただけでは高い除染率は得られない
C-3		ブロック塀上面	ブラッシング		0.90	0.68	24	金属ブラシでブラッシング かなりの労力が必要であり、粉塵も発生する
C-4		U字溝内	有機酸		4.1	3.3	20	周辺線量が高く2cmの鉛遮蔽体は外部からのガン マ線を透過しているものと推測(A-5参照)
C-5		U字溝内	硫酸アンモニウム		1.7	0.61	64	前処理後湿潤状態20時間
C-6		ブロック塀上面	硫酸アンモニウム		0.83	0.60	28	前処理後湿潤状態10時間
C-7		ブロック塀上面	硫酸アンモニウム		0.83	0.37	55	前処理後湿潤状態20時間
C-8		ブロック塀上面	塩化アンモニウム		0.78	0.59	24	前処理後湿潤状態10時間
C-9		ブロック塀上面	塩化アンモニウム		0.79	0.51	35	前処理後湿潤状態20時間
C-10		敷板上面	なし		0.61	0.36	41	土壌が細孔に入り込んだコンクリート板
C-11		敷板上面	なし		0.59	0.30	49	土壌が細孔に入り込んだコンクリート板
C-12	浄化槽上面	ブラッシング	0.32	0.34	-6.3	中性洗剤を使いデッキブラシで洗浄 実質的な効果なし		
C-13	排水溝蓋	ブラッシング	0.55	0.55	0.0	中性洗剤を使いデッキブラシで洗浄 実質的な効果なし		
C-14	敷石上面	なし	1.3	1.2	7.7	9MPaの高圧洗浄だが実質的な効果なし		
C-15	敷石上面	硫酸アンモニウム	1.3	1.2	7.7	9MPaの高圧洗浄だが実質的な効果なし		
C-16	車止め上面	硫酸アンモニウム	3.9	1.8	53	前処理後湿潤状態20時間		
C-17	車止め上面	硫酸アンモニウム	5.8	3.0	48	前処理後乾燥状態		
C-18	車止め上面	塩化アンモニウム	3.8	2.3	39	前処理後湿潤状態20時間		
C-19	車止め上面	塩化アンモニウム	5.5	1.8	67	前処理後乾燥状態		
C-20	車止め上面	有機酸	4.2	2.2	48	洗浄20分前に噴霧		

表2 アスファルト(13検体)

No.	地域名	対象場所	前処理	洗浄水	線量率(μ Sv/h)		除染率 (%)	備考
					洗浄前	洗浄後		
A-1		路面	なし	モルクラスター オゾン水	0.49	0.13	73	洗浄後はアスファルト面が軽く研磨された状態
A-2		路面	水道水散布		1.3	0.42	68	洗浄後はアスファルト面が軽く研磨された状態
A-3		路面	なし		2.1	0.87	59	洗浄後はアスファルト面が軽く研磨された状態
A-4		路面	なし		0.68	0.24	65	洗浄後はアスファルト面が軽く研磨された状態
A-5	伊達市	路面	高圧洗浄	モルクラスター オゾン水	7.9	2.1	73	雨樋直下 2cmの鉛遮蔽体では3.6 μ Sv/hであったものが、5cm の鉛遮蔽体を用いると2.1 μ Sv/hとなった
A-6		路面	アスファルト溶解剤		0.95	0.34	64	タール分が溶脱し構造が脆弱になる
A-7		路面	ブラッシング		0.66	0.63	4.5	実質的な効果なし
A-8		路面	なし		7.9	7.9	0.0	A-5において高圧洗浄したが効果なし
A-9	浪江町	路面	なし	高圧スチーム	0.63	0.68	-7.9	実質的な効果なし
A-10		路面	なし	モルクラスター オゾン水	9.5	4.4	54	空間線量率>10 μ Sv/hの地域であることから5cm以 上の遮蔽体を利用して計測
A-11		路面	なし		6.7	2.4	64	
A-12		路面	なし		4.1	1.7	59	
A-13	路面	なし	3.9		1.5	62		

表3 土壌、建材等 (16検体)

No.	地域名	対象場所	前処理	洗浄水	線量率(μ Sv/h)		備考
					洗浄前	洗浄後	
D-1	伊達市	建材(壁側面)	なし	モルクラスター オゾン水	0.13	0.13	壁面の表面線量率は4面とも空間線量率より低い
D-2		建材(門柱上面)	なし		0.66	0.27	壁面と同じ材質 洗浄後も脱色等なし
D-3		レンガ(上面)	なし		0.90	0.39	無数の細孔がある 高圧洗浄の効果はない(D-9)
D-4		石材(上面)	なし		0.34	0.17	人工石材で表面が粗い
D-5		室外機(上面)	なし		0.57	0.31	金属表面からのガンマ線を拾っている可能性あり
D-6		ガードレール(側面)	なし		0.63	0.65	塗料面を剥がしても表面線量率は変化せず
D-7		土壌	なし		>10	5.2	表面線量率10 μ Sv/h超過
D-8		建材(門柱上面)	なし	高圧水道水	0.66	0.65	実質的な効果なし
D-9		レンガ(上面)	なし		0.63	0.60	実質的な効果なし
D-10	浪江町	土壌	硫酸アンモニウム	モルクラスター オゾン水	4.0	1.3	団粒構造が発達し通水性が良い土壌
D-11		松葉	なし		3.1	1.6	針葉樹付近は空間線量率が高い(>30 μ Sv/h)
D-12		松葉	なし		3.1	1.2	洗浄の翌日に水分を切って再測定
D-13		クヌギ、カエデ	なし		0.32	0.33	広葉樹の葉面汚染は低い(3月時点で発葉していない)
D-14		松樹皮	なし		2.4	1.5	樹皮の層状構造の中の水を脱水できず
D-15		堆積腐植	なし		>10	3.2	>68
D-16	腐植層下土壌	なし	なし	6.2	2.2	65 有機質に富み通水性が非常に良い土壌	

9. 結論

- ・ 高圧洗浄で全く除染することができないコンクリートやアスファルトも当該モルクラスターオゾン水を用いることにより効率よく除染できる。
- ・ モルクラスターオゾン水で洗浄する前に、化学薬剤で処理することによって、より除染効率を向上させることができる。
- ・ 建屋壁面の汚染は低く、除染の対象とすべき構造体は従来から指摘されている屋根や雨どい等と同様に、地面と平行である（あるいは平行に近い）コンクリート面やアスファルト面である。そのような構造体の除染に本方法は有効である。
- ・ 雨どいの受桁直下は線量率が極めて高い。コンクリート・土壌の除去あるいは洗浄が必須である。
- ・ 森林は最も注意すべき放射性物質のリザーバーのひとつであり、森林内の空間線量率は極めて高い。森林（特に放射性物質を捕捉しやすい針葉樹林）の洗浄が重要である。
- ・ 葉、枝、幹、腐植堆積物、その直下の土壌もモルクラスターオゾン水を用いることにより効率よく除染できる。
- ・ モルクラスターオゾン水で植物を洗浄しても植物になんら影響を及ぼさない。

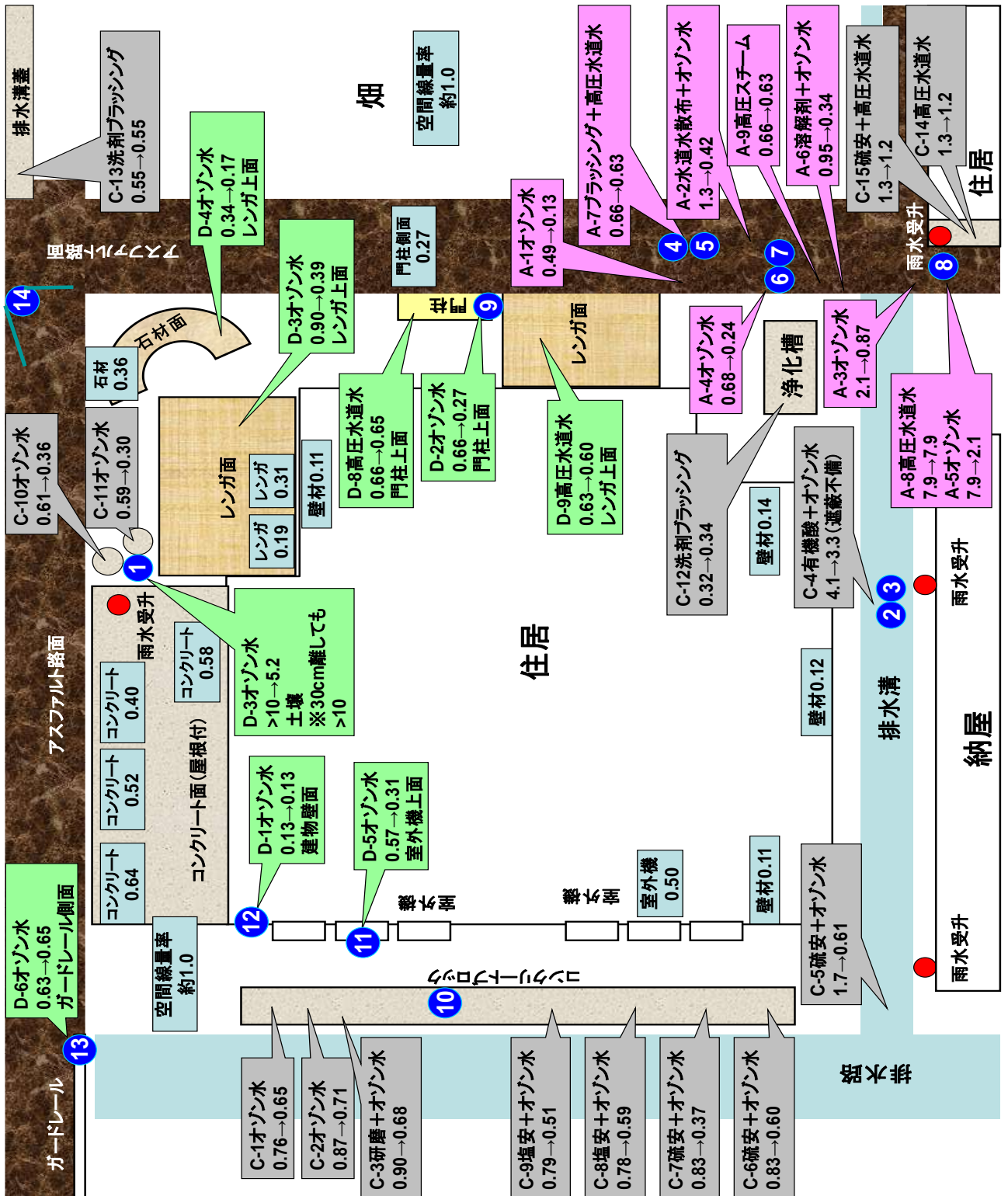
謝辞

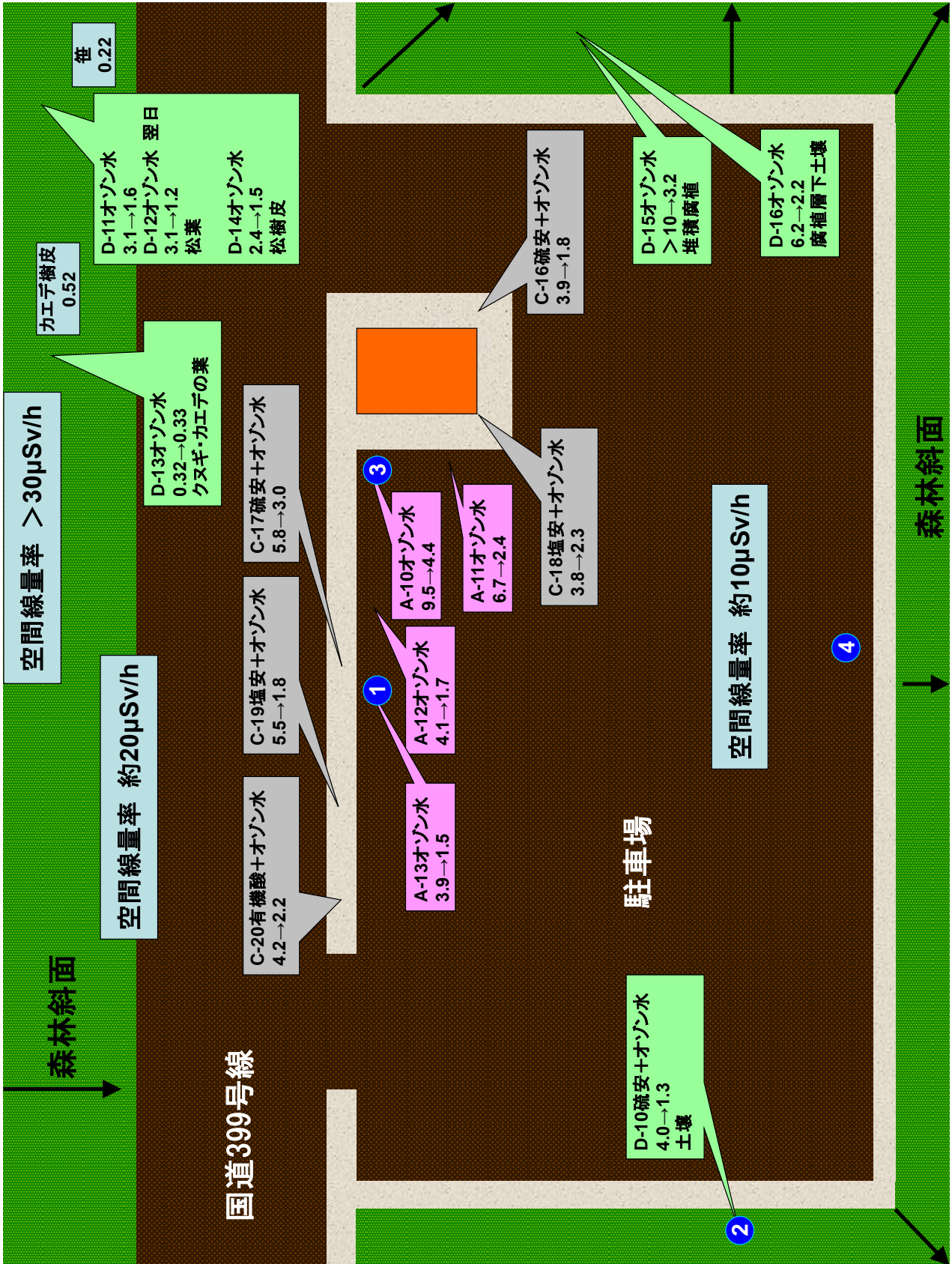
本実証実験は、独立行政法人日本原子力研究開発機構の依頼を受けた東京都市大学工学部原子力研究所の岡田往子准教授の立会・協力を得て実施したものである。計測方法については岡田准教授の指導のもと、できる限りバックグラウンド放射線の影響を受けないよう遮蔽等の措置を取った。また、測定機器は1年以内に校正を受けたものを借用し、測定時間は1分間から3分間の移動平均値を取り、変動誤差を極力少なくする努力を払った。

実験当日は終日岡田准教授に高線量率の現場において長時間お立会いただき、実験に対するアドバイスと得られたデータの確認をしていただいた。この場を借りて岡田往子准教授に深謝申し上げます。

実験実施責任者

ネイチャーズ株式会社 代表取締役社長 松村 栄治
東京都市大学 工学部原子力研究所 准教授 岡田 往子





安全作業のための除染作業確認事項（自主基準）

モルクラスターオゾン水散布による除染作業の安全性を確保する上で、特にオゾンの万一の吸引を防止するために下記の安全対策を行うことを計画致します。

【基本的安全対策】

- ① 除染に際して、除染区域を設け、人が侵入しないよう管理する。
除染区域は、ロープ、パイロンなどを用いて明確に判別できるようにする。
 - ② 除染区域の管理のための人員を配置する。
監理者は、ハンディマイクを携行し、拡声して除染作業の開始終了ほか除染作業者全員に安全のための作業情報を知らせる。
 - ③ モルクラスター除染の散水作業に従事する担当者、区域内での補助作業、線量計測作業等に従事する担当者は次の仕様のマスクを着用する。
 1. 散水地点の半径 5m 以内で作業する担当者：
オゾン分解触媒（荏原実業社製 OZ-1000）、隔膜式防塵マスク用吸収缶（CA-501 /AG JIS T8152 適合缶）を直列に配置した全面マスクを着用する。
 2. 散水地点の半径 10m 以内で作業する担当者：
酸性ガス用吸収缶（3M 製 3002JAG）マスクを着用すると共に、ゴーグルを着用して目を保護する。
 3. 散水地点の半径 50m 以内で作業する担当者および見学者：
活性炭マスク（KOKEN LTD. 製マスキーマD）を着用する。

※オゾン分解吸収缶、活性炭マスクは同様の仕様のものを代替できる。
 - ④ モルクラスターオゾン水散布の前に、散水処理する地点における、風向きと風速を確認し風上から風下方向へ散水し作業員が吸引しないよう予防する。
- （当事業で計画する除染時には、マザーツール社製風速計 LM-8000 を用いる。）
- ⑤ 環境オゾンモニターを用いて、除染区域境界で環境オゾン濃度基準値 0.1ppm を超えないように監視する。

（当事業では、荏原実業社製 AET-030P 環境オゾンモニターを使用する。）

【住居建屋を対象にした安全対策】

- ⑥ 基本的安全対策で除染した後室内全域のオゾンガス濃度を、環境オゾンモニターを用いて計測し 0.1ppm 以上のオゾンガスの残存が無いことを確認する。さらに 10 分間以上経過後、残留オゾンがなく安全で

あることを確認の上、区域内へ戻っていただく。

【除染区域内に見学者が立ち入る場合の措置】

- ⑦ 次の手順で見学者の安全を確保する。
 1. 見学者は、活性炭マスクを必ず着用する。
 2. 除染作業開始以前に、オゾンの物性と安全対策について説明を励行する。
 3. モルクラスターを用いる際に、管理者は風向きを確認して、見学者全員に周知し風下方向に人がいないことを確認した上で、拡声器で全員に周知し散水を開始する。
 4. 除染区域に立ち入る場合は、管理者が残留オゾン濃度が安全域であることを確認した上で実施する。

【事故対応】

- ⑧ 不測の事態が発生した場合
 1. 事故が発生した場合、直ちに散水作業を停止すると共に、生成装置を緊急停止する。
 2. 万一オゾンガスを吸引する事故が発生した場合、直ちに安静にし、医師の診察を受ける。
(近隣の救急医療機関情報を把握した上で行う)

ネイチャーズ株式会社
(2012年3月時点)