

RI 施設の廃止措置におけるレーザー除染の適用

田中聖一朗^{*1}・佐藤光浩^{*2}・今井 久^{*3}・木川田一弥^{*4}

原子力発電所や放射線利用施設等の廃止措置への適用に向けて、レーザー技術を活用した除染システムの開発を行っている。レーザー除染は、非接触加工であるため二次廃棄物が少なく、遠隔操作に適しているため作業員の被ばく低減が可能であるという特長を有する。レーザー除染システムの実用化に向けて、RI 施設の廃止措置で発生した排気ダクト等の放射性汚染物に対してレーザー除染適用試験を実施した。結果として、塩ビライニング鋼板、亜鉛メッキ鋼板、木質化粧板に対してレーザー除染システムの除染効果が確認された。また、発生する廃棄物量の抑制効果・減容効果も確認された。

キーワード：レーザー、除染、廃止措置、RI施設、放射性廃棄物

1. はじめに

近年、レーザー装置の高性能化や高出力化により、レーザー技術は様々な産業分野に利用されている。なかでもレーザーの持つ極めて大きなエネルギー密度を利用したレーザー加工は、主要な利用分野の一つとなっており、金属部品の切断、穿孔、溶接などは既に実用化されて久しい。このレーザー加工技術を原子力施設や放射線利用施設の廃止措置における除染工程に応用することが今後期待されている^{1), 2)}。レーザーを利用した除染技術は、以下の特長を有する。

- ① 物質表面にレーザー光を照射すると、表面物質を急速に加熱して、熔融・蒸散現象が発生する。この現象を利用することで、固着・浸透した汚染物表面に対して効率的な除染が期待できる。
- ② レーザー除染は媒体を使用しない乾式プロセスであるため、二次廃棄物の発生がなく、また適切な制御（除染範囲・深さをコントロール）により一次廃棄物の発生が抑制可能である。
- ③ レーザー装置は比較的軽量で作業時の反力が小さいため、機械化（自動化、省力化、遠隔化）に適している。また、形状の入り組んだ複雑な部位や狭隘箇所に対しても適用が可能である。

このようなレーザーの特長を活用し、原子力発電所等の廃止措置への適用に向けて、高線量に汚染された建屋・設備・機器等の表面汚染の除去を目的とした遠隔操作式レーザー除染システムを開発した³⁾。開発したシステムの実用化に向けて、非密封放射性同位元素施設（以下、RI 施設）の廃止措置で発生した放射性汚染物に対して

レーザー除染適用試験を実施した。本稿では、適用した除染システムと試験結果について報告する。

2. レーザー除染システム

レーザー除染は、レーザー光を対象物表面に照射することにより生じるレーザーの反応熱を利用して、照射部分を瞬間的に昇温させ物質表層（汚染箇所）を熱膨張や熔融昇華により除去する技術である。本研究におけるレーザー除染は、極めて小さな面積にレーザーを集光し、高速で繰り返し走査（スキャン）することを特徴とする^{4), 5)}。

レーザー除染システムの構成を図-1に示す。本システムは、レーザーを制御し照射するレーザーヘッド部と、3次元の動作が可能な多関節のロボットアーム部、装置全体を移動させる台車部から構成され、ヘッド部には除去した汚染物質を回収するための集塵装置のホースが接続されている。使用したレーザー発振器はCWファイバーレーザー（波長：1080nm）で、最大出力は500Wである。既報³⁾では、本システムのコンクリートや鋼材表面に対する切削性能の検証について報告している。

レーザーは光学レンズで集光することによりスポット位置でのパワー密度を高めることができる（図-2(a)）。照射面に対してレーザーは点（小さな円形）であるが、これをミラーユニット等（写真-1）で走査することで線状、さらには面状の領域を照射することが可能となる（図-2(b)）。ある面積を持つ対象範囲の除染を行うには、レーザーヘッドで制御可能な範囲を基準の区画（およそ10cm×10cm）として割り付けし、1区画ずつレーザーの

*1 構造・材料研究部 *2 エネルギー事業技術部 *3 原子力部 *4 フロンティア研究部

照射とレーザーヘッドの移動を繰り返すことによって対象範囲全域をカバーする（図-3）。

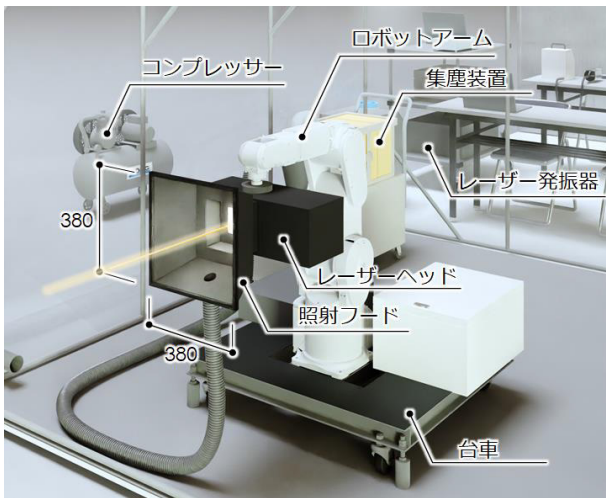


図-1 レーザー除染システムの構成

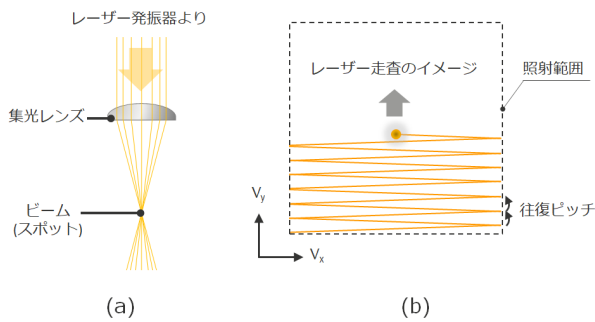


図-2 1区画内のレーザー制御

(a) レーザーの集光イメージ, (b) レーザー走査イメージ

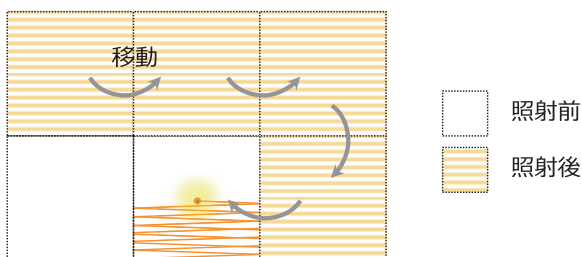


図-3 ある面積に対するレーザー除染の進め方例
(6区画対象)

3. レーザー除染適用試験の概要

3.1 対象素材

本システムの除染性能を確認するための実証試験を、RI施設の廃止措置に伴って発生した排気ダクト等の放射性汚染物に対して実施した。試験対象の試料は、塩ビライニング鋼板、亜鉛メッキ鋼板、木質化粧板の3種類

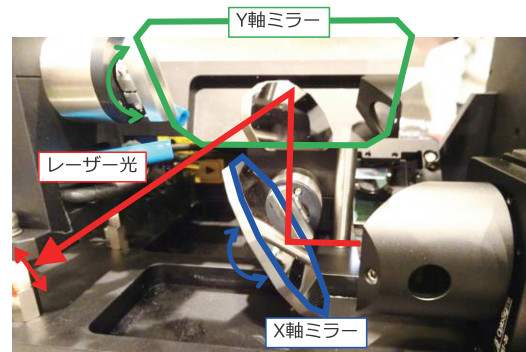


写真-1 ガルバノミラーユニット

である（写真-2参照）。塩ビライニングや亜鉛メッキは耐水性・耐薬品性・防食性が高いため、RI施設の排気ダクトや排水管等の内表面に多く使用されている。本試験で対象とした試料は長尺の排気ダクトを切断・解体して平板状にしたものである。また、木質化粧板はRIを取り扱うドラフトチャンバに使用されていた材料の一部で、木質系の繊維を樹脂で硬化させた板状の母材表面に仕上げ樹脂層が存在する構造である。これらは放射性核種である¹³⁷Cs（セシウム137、半減期：30.17年）による汚染があり、事前に洗浄剤を用いて表面除染を行ったが、表面材料の劣化等による浸透汚染が残存したため、表層部を除去する方法としてレーザー除染を適用した。表面汚染密度は、最も汚染度の高かった木質化粧板で550Bq/cm²であった。各素材の数量は、塩ビライニング鋼板が50枚（試料面積：260～1,610cm²、総面積：約60,000cm²）、亜鉛メッキ鋼板（試料面積：98cm²）、木質化粧板（試料面積：252cm²）はそれぞれ1枚であった。

RI施設では、汚染の程度が様でない「不均一な汚染」が多い。排気設備の場合では、RIの揮発や、RIが空気中のホコリやエアロゾルに付着して排気に乗って移動し、ダクト内に吸着するため、RIを取り扱うドラフトチャンバ付近で汚染の程度が高くなる傾向がある⁶⁾。そのため、本試験で対象とした試料も汚染の程度が不均一であった。

3.2 レーザー照射手順

レーザー照射の手順を図-4に示す。まず、除染対象の試料を壁面に設置し、次にレーザーヘッドを近づけ、フード部が照射範囲を覆うように密着させた。照射範囲をフードで覆うことで、レーザーからの人体防護および発生する粉塵の拡散防止を図っている。フードの密着状態を確認後、レーザー照射を開始した。照射に伴い発生した粉塵は気流によりフードに接続されたホースを通過後、集塵装置により回収される仕組みである。レーザー照射が完了してから一定時間経過後にフードを解放する

ことで、粉塵をより確実に回収できるように配慮した。

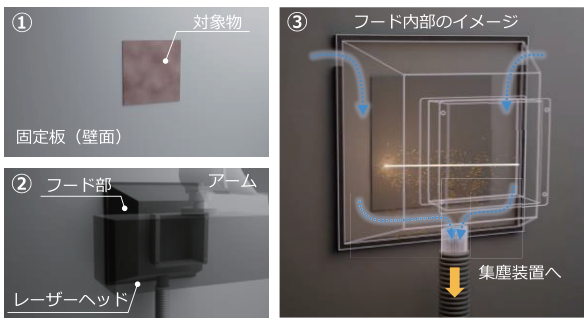


図-4 レーザー照射手順

3.3 作業環境と放射線安全管理

除染試験にあたり、作業区域をグリーンハウス（以下、GH）で区画養生した（図-5）。GHとは仮設の囲いのことでパイプフレームにビニルシートで覆いをした構造である。上述の照射フードによる局所的な一次区画に加えて、GHによる二次区画を設けることで汚染の拡大を防止した。また、集塵装置はGH内に配置することにより、集塵装置から汚染の漏洩が発生した場合でも二次区画内で対処できるようにした。GH内は陰圧に保持し、GHからの排気を施設の既設排気設備へ接続することにより、GH内の空気の拡散を防止するとともにモニタリングを行った。また、レーザー除染システムは遠隔操作方式のため、除染作業中はロボットアーム等の制御プログラムを実行することによりGH内を無人化した。作業状況はカメラおよびモニタを通じてリアルタイムで監視した。その他、試験期間中の放射線安全管理として以下の項目を実施した。こうした管理を行った結果、試験期間を通じて空気汚染の発生はないことが確認され、作業者の被ばくの発生もなかった。

- ① 線量計着用による作業中の外部被ばく線量測定
- ② ダストサンプラによる作業中のGH内の空気中放射能濃度測定
- ③ 作業エリアの表面汚染検査（GM管式サーベイメータによる直接測定とスミア法による間接測定）

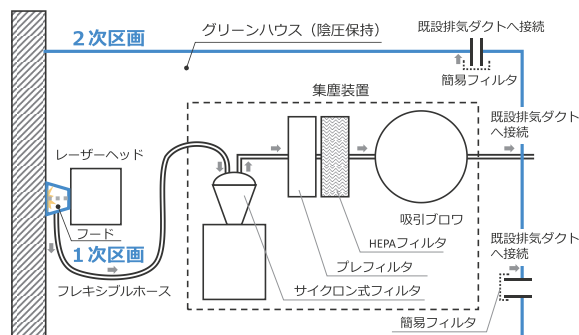


図-5 作業環境（汚染拡大防止のための対策）

3.4 除染評価

塩ビライニング鋼板は数量が多いため、効率的な測定を行うために、対象試料と同程度の有効窓面積を有する大面積のガスフロー式の比例計数管を使用した。大面積の検出器を使用する場合、バックグラウンドが大きくなるため、検出限界が悪化する問題がある。除染完了の基準は、管理区域外への持ち出し基準の10分の1にあたる表面密度限度の100分の1（汚染核種¹³⁷Csに対して0.4 Bq/cm²）として、検出限界表面密度がこれを十分に下回るように計測時間を1分に設定した。検出限界表面密度 N_A (Bq/cm²) は式(1)により求めた⁷⁾。

$$N_A = \frac{\text{検出限界計数率 } N_D(\text{cpm})}{\text{計数効率 } \varepsilon \times 60(\text{sec}) \times \text{検出器有効面積 } (\text{cm}^2)} \quad (1)$$

そのうえで、有意な汚染の判定として、測定値が検出限界計数率（バックグラウンド計数率との区別が可能な最低の計数率）を超えていないことを確認した。検出限界計数率 N_D (cpm) は式(2)により求めた⁸⁾。

$$N_D = \frac{K}{2} \left\{ \frac{K}{t_s} + \sqrt{\left(\frac{K}{t_s}\right)^2 + 4N_b \left(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b}\right)} \right\} \quad (2)$$

ここで、 K は標準偏差の何倍となるかを示す係数 ($K=3$)、 t_s は試料測定時間(分)、 t_b はバックグラウンド計数率測定時間(分)、 N_b はバックグラウンド計数率(cpm)である。

4. 試験結果および考察

4.1 除染評価

除染前後の各試料の状況を写真-2に示す。レーザー照射回数は、塩ビライニング鋼板で8回、亜鉛メッキ鋼板で6回、木質化粧板で11回である。いずれもレーザー照射により表層部が除去されており、とくに塩ビライニング鋼板は金属光沢が確認できる。

図-6にレーザー除染を適用した塩ビライニング鋼板の除染前後の正味計数率（試料の全計数率からバックグラウンド計数率を差し引いた値）の結果を示す。レーザー除染により、全ての試料について検出限界計数率未満に除染できた。また、除染の達成度を測る指標として、除染率を式(3)で定義した。

$$\text{除染率}(\%) = \frac{(\text{除染前計数率}) - (\text{除染後計数率})}{(\text{除染前計数率})} \times 100 \quad (3)$$

除染率は汚染が除去された割合のことで、除染前の計数率に依存するため程度に差はあるが、70%以上を達成した。除染率が低くなっている試料は、除染前計数率が低い試料である。亜鉛メッキ鋼板と木質化粧板の除染前後の正味計数率変化および除染率の結果を表-1に示す。いずれも95%以上の除染率が得られた。

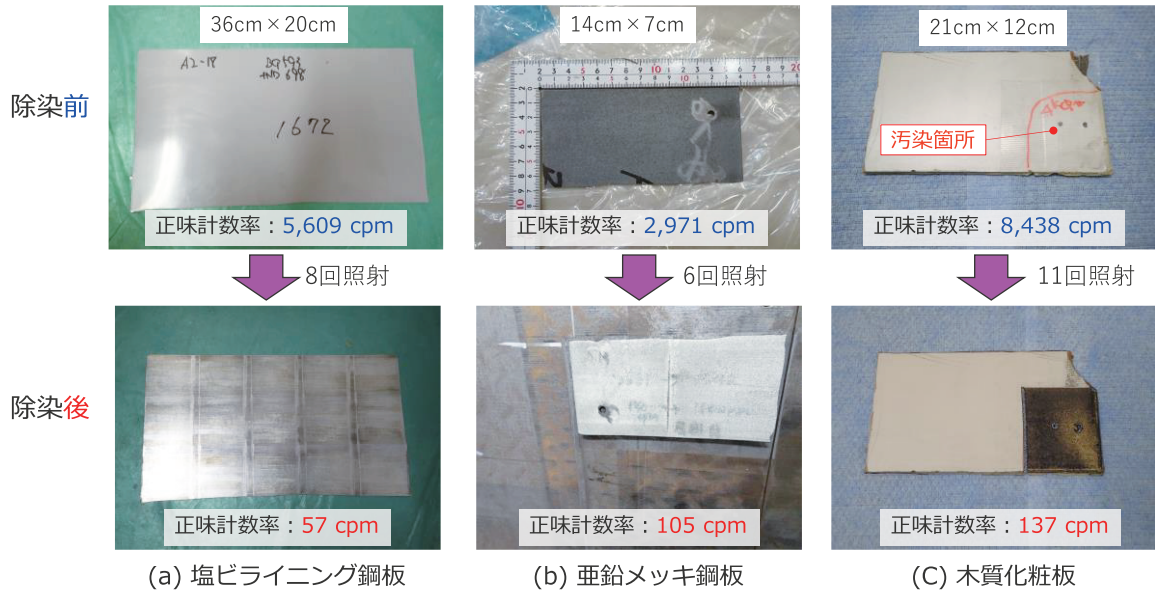


写真 - 2 除染前後の試料状況

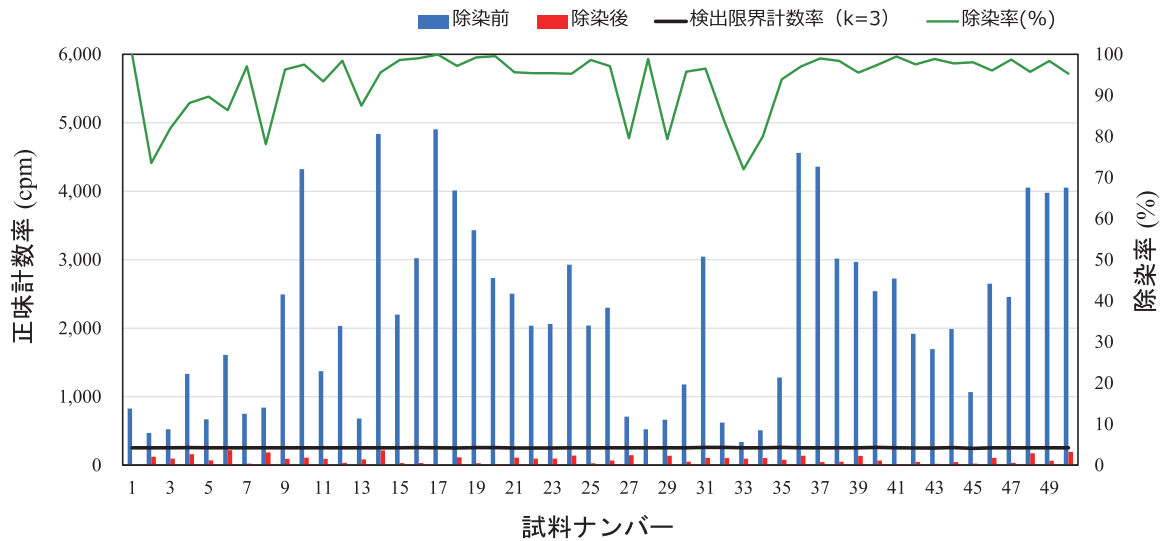


図 - 6 塩ライニング鋼板の除染前後の正味計数率変化および除染率

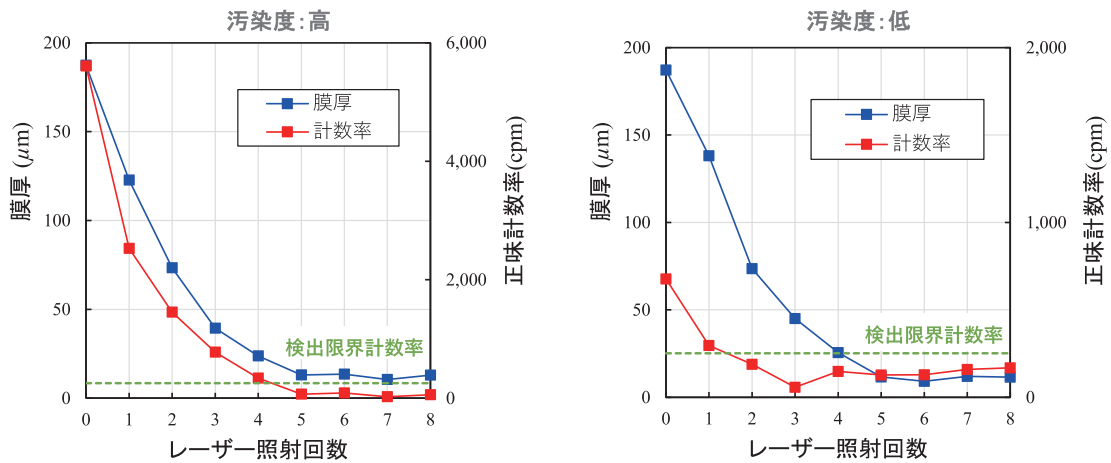


図 - 7 照射回数と膜厚および計数率の関係 (塩ライニング鋼板)

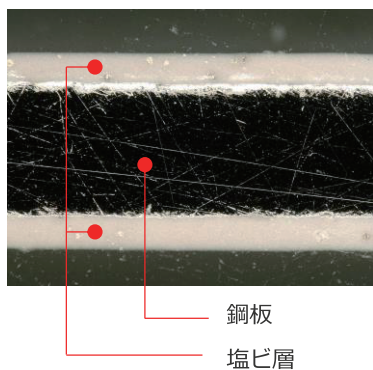
表－1 亜鉛メッキ鋼板と木質化粧板の除染前後の正味計数率変化および除染率

試料	除染前 正味計数率 (cpm)	除染後 正味計数率 (cpm)	除染率 (%)
亜鉛メッキ鋼板	2,971	105	96
木質化粧板	8,438	137	98

4.2 照射回数と膜厚および計数率の関係

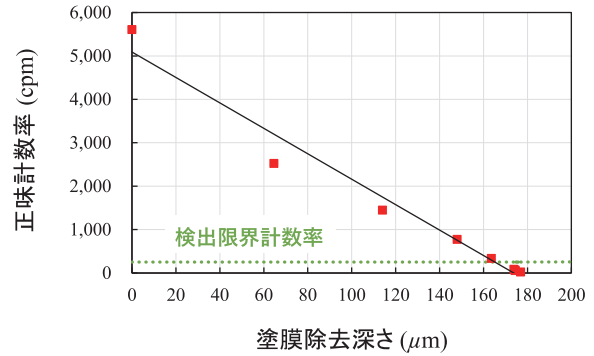
(1) 塩ビライニング鋼板

汚染の浸透深さについて、塩ビライニング鋼板を対象に、レーザー照射回数ごとに計数率と膜厚をそれぞれ測定することにより、深度方向の汚染分布を評価した。写真－3に同一材料の非汚染試料を対象とした断面観察の写真を示す。膜厚の測定には電子膜厚計（渦電流方式）を使用し、試料の中央および四隅の計5点で計測を行い、平均値を求めた。測定精度は±3%程度である。また、汚染度の影響についても確認するため、汚染度の異なる試料2点を選定して比較した。図－7にレーザー照射回数と膜厚および計数率の関係を示す。レーザー照射前の塩ビ層の膜厚は約180μmであった。膜厚の減少とともに計数率が低下していることが確認できる。いずれも5回程度の照射で膜厚の減少は収束したが、計数率が検出限界計数率まで低下するのに必要な照射回数は、汚染度が高い試料で5回、汚染度の低い試料で2～3回という結果となった。汚染度と汚染の浸透深さには相関があり、汚染度が高いほど浸透深さが深いと考えられる。図－8に汚染度の高い試料について塗膜除去深さと照射後の計数率の関係を示す。除去深度に応じて、計数率は線形的に減少した。汚染は塩ビ塗膜内への拡散により侵入するためと考えられるが、検出限界計数率まで除染するためには塗膜をほとんど除去する必要があることがわかつ



写真－3 塩ビライニング鋼板の断面
(非汚染試料)

た。また、照射1回当たりの塗膜除去厚さや汚染除去量は回数を重ねるごとに減少する傾向にある。これは、母材表面に近くなると母材への熱拡散の影響が出てくるためであると考えられる。



図－8 塗膜除去深さと計数率の関係

(2) 亜鉛メッキ鋼板と木質化粧板

亜鉛メッキ鋼板と木質化粧板について計数率が検出限界計数率まで低下するのに必要な照射回数を評価した。図－9に各試料のレーザー照射回数と計数率の関係を示す。各試料ともに検出限界計数率まで低下したが、亜鉛メッキ鋼板の必要な照射回数は6回程度であったのに対して木質化粧板は11回程度を要した。特に木質化粧板では3回目まではほとんど効果がなかったが、4回目以降は連続照射することにより計数率が低下した。これは、表層部の劣化等による汚染の浸透度合いが大きかったことが一因として考えられる。このように、試料の種類や汚染状況によって除染効率が変わるため、実際の除染作業前にコールド試料（非汚染試料）を使用したレーザーのパラメトリック試験を実施し、除去深さ等からレーザー照射条件を最適化させておくことが重要である。

また、汚染度の高かった木質化粧板についてはγ線スペクトロメーターであるLaBr₃ (Ce) 検出器を用いて除染前後のγ線スペクトルを測定した。取得したγ線スペクトルの結果を図－10に示す。レーザー照射により、¹³⁷Csの662keVピークが消失していることがわかる。1,460keVのピークは天然放射性核種である⁴⁰K（半減期：1.26 × 10⁹年）によるバックグランド成分である。

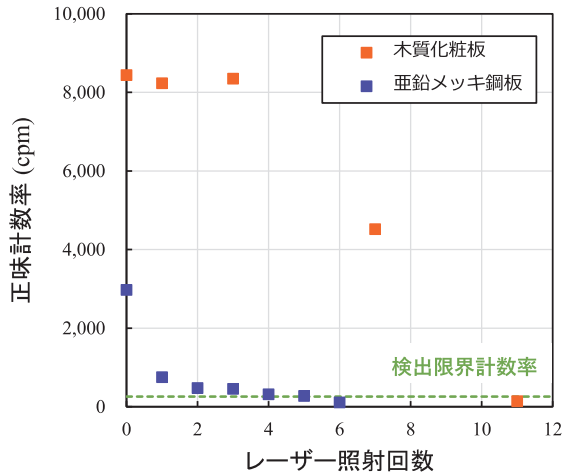


図-9 照射回数と計数率の関係
(木質化粧板と亜鉛メッキ鋼板)

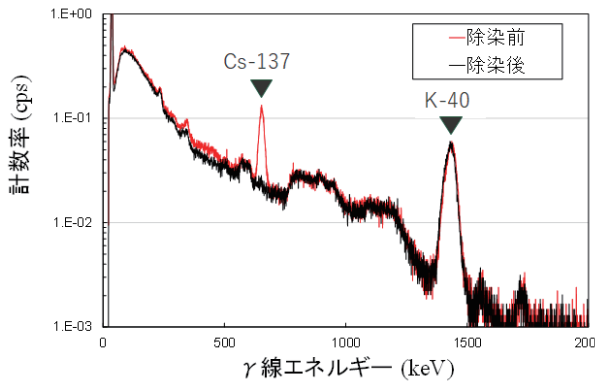


図-10 除染前後のγ線スペクトル
(バックグラウンド含む)

表-2 発生した RI 廃棄物

種類	50Lドラム缶本数 または容量	内容物
可燃物	1本	ウエス、タイベック
難燃物	2本	ゴム手袋、ビニル養生資材
		集塵装置用プレフィルタろ材 (300mm×300mm×作業日数)
非圧縮性不燃物	1本	グリーンハウス用排気フィルタろ材 (φ100mm×作業日数、 φ75mm×作業日数)
フィルタ	18L	サイクロンフィルタ-集積缶 (20Lペール缶)
不燃物	1本	焼却型HEPAフィルタ (300mm×300mm×100mm)×2枚
		汚染粉塵(サイクロンフィルタから回収)

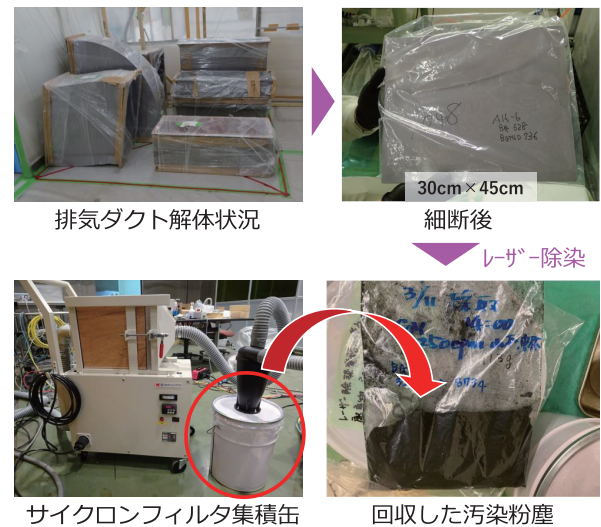


写真-4 レーザー除染による RI 廃棄物の減容効果

4.3 発生した RI 廃棄物

表-2に本試験で発生した RI 廃棄物の種類と数量を示す。レーザー照射により発生した切削粉塵はサイクロンフィルタの集積缶から回収した。レーザー除染で発生した一次廃棄物は粉末状であるため、容器に効率よく収納でき、減容効果が高いことが確認された(写真-4)。また、除染完了後の鋼板等は「非放射性廃棄物(NR)」として扱うことが可能となる。一方で、集塵装置用のフィルタは目詰まり防止のために作業日ごとに交換したため、廃棄物全体に占める割合としては大きくなった。フィルタの交換頻度削減のための粉塵回収方法については今後の課題である。

5. まとめ

レーザー技術を活用した除染システムの実用化に向けて、RI施設の廃止措置で発生した排気ダクト等の放射

性汚染物に対してレーザー除染適用試験を実施し、以下のことが確認された。

- ① 塩ビライニング鋼板、亜鉛メッキ鋼板、木質化粧板に対してレーザー除染を行い、照射前後の表面汚染状況を比例計数管で測定することにより、除染効果を確認した。
- ② 塩ビライニング鋼板を対象に、レーザー照射回数と計数率および膜厚の関係を調査した結果、汚染度や照射条件にもよるが、5回程度の照射で膜厚の減少は収束し、計数率はバックグラウンドレベルまで低下した。
- ③ 試料の種類や汚染状況によって、除染効率が異なるためレーザー照射の最適条件の調査・整理は今後の課題である。
- ④ 適切な粉塵回収やGH内の陰圧保持により、空気汚染の発生や作業員の被ばくを防止できた。

謝辞

本研究の実施にあたり、株式会社巧喜 山本多喜夫氏、東京ニュークリア・サービス株式会社 川村広和氏、エーエルティ株式会社 高野裕氏、LDD 株式会社 峰原英介氏に多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 長谷川秀一等：レーザー加工により発生する微粒子の解析と核種同定手法の開発，JAEA-Review 2022-015，2022
- 2) 三輪修一郎等：福島第一原子力発電所の廃止措置における放射性エアロゾル制御及び除染に関する研究，JAEA-Review 2022-061，2022
- 3) 田中聖一朗等：遠隔操作式レーザー除染技術の開発，安藤ハザマ研究年報，Vol.9，2021年
- 4) 峰原英介：3次元高出力レーザー走査による原子力関連施設の完全放射能除染，O Plus E，5月号，pp.476-483，2013
- 5) 峰原英介，今井久，山田淳夫：簡素化した全自動レーザー除染機的设计と製作，日本原子力学会「2018年秋の年会」予稿集，p.3F11，2018
- 6) 日本放射線安全管理学会：放射線施設廃止の確認手順と放射能測定マニュアル，p.4-2，2020
- 7) JIS Z4504:放射性表面汚染の測定方法 -β線放出核種(最大エネルギー0.15MeV以上)及びα線放出核種，日本規格協会，2008
- 8) 中村尚司，他：はじめての放射線測定 -正しく理解し，正しく測ろう放射線-，日本アイソトープ協会，p.129，2012

Laser decontamination application for decommissioning of an radioisotopes facility

Seiichiro TANAKA, Mitsuhiro SATO, Hisashi IMAI and Kazuya KIKAWADA

We have been developing a decontamination system using laser technology for application to the decommissioning of nuclear power plants and radiation application facilities. Laser decontamination is a non-contact process that generates little secondary waste and is suitable for remote operation, thus reducing worker exposure. Toward the practical application of the laser decontamination system, we conducted an application test of the laser decontamination system to radioactive contaminated materials such as exhaust ducts generated during decommissioning of a radioisotopes facility. As a result, the decontamination effect of the laser decontamination system was confirmed for vinyl chloride coated steel plate, galvanized steel sheet, and wood veneer. In addition, the system was also confirmed to be effective in reducing the amount and volume of waste generated.