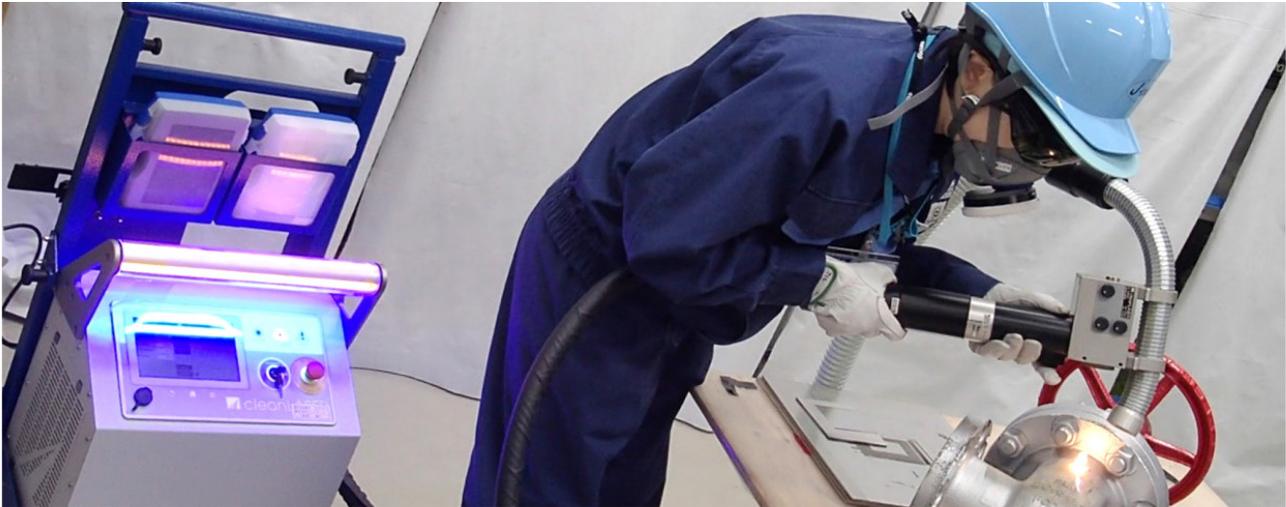


母材に優しいレーザクリーニング技術

市川 友博、野田 静枝、佐藤 結



レーザクリーニングとは、塗装・錆・ゴム・樹脂・油分等が付着した母材にレーザ光を照射し、母材の表面から付着物を剥離する技術であり、国内外で文化財等の彫刻品および製造ラインの金属部品の仕上げ、金型のクリーニング等に活用されている。特徴は、レーザ照射による母材へのダメージが小さく、作業により発生する廃棄物量が少ないクリーンな技術である。

当社はこの技術に着目し、六ヶ所再処理工場における使用済み部品等の再利用を目的としたレーザクリーニング技術開発に取り組んできた。

その取組みの結果、各種母材、形状、付着物（錆、塗料、樹脂等）に対してクリーニングが可能であり、レーザ照射による母材への影響が極めて小さいことを確認した。

本稿では、レーザクリーニング技術に関する剥離能力評価および母材への影響確認試験について紹介する。

キーワード：レーザクリーニング、除染、付着物剥離、ワイドレーザ、WIDE LASER

1. はじめに

六ヶ所再処理工場においては、今後の長期本格操業運転に対応して、保守等の作業により発生する放射性廃棄物発生量の低減や、現場作業員の被曝低減の目的で各種除染方法の適用検討が行われており、その重要性は竣工後にますます増大すると考えられる。[1]

当社は除染方法の一つとして、機器母材への影響が少なく、かつ二次廃棄物の発生量が少ないレーザクリーニング技術を選定し、各種母材について付着物の剥離および影響を試験により確認し、多くのサンプルで付着物の剥離に成功した。

また、レーザクリーニング技術を広く活用できるようにするために、放射線環境下での作業を考慮しレーザクリーニング装置に遠隔操作ロボットを組合せたシステム

やコンパクトで移動可能なレーザクリーニング装置を導入し、開発を進めている。

2. レーザクリーニング技術の概要

レーザクリーニング技術は、レーザを金属等母材の表面の付着物に照射し、付着物を昇華させると同時に照射表面で急激に生成されたプラズマの衝撃圧により、母材の付着物を剥離させる技術である。レーザクリーニング技術の概要図を図1に示す。

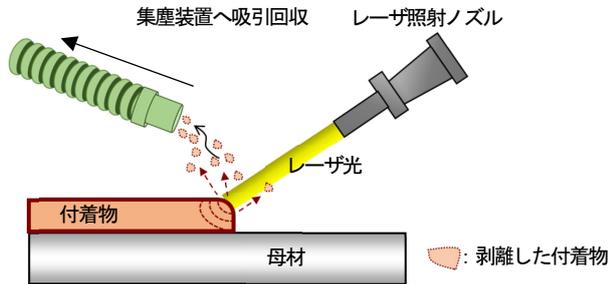


図1 レーザクリーニング技術概要

剥離した付着物は、フィルタを備えた集塵装置等で、照射とともに吸引回収する。一般的な薬品等の液体を用いた洗浄方法と比較すると、レーザークリーニング技術はドライプロセスであるため、廃液の処理が不要となることから二次廃棄物の抑制が可能である。

3. レーザクリーニングシステム

当社は目的に応じて対応できるレーザー発振器およびレーザー照射ノズルを主としたレーザークリーニングシステムを2基所有している。

図2に示す遠隔操作可能なシステムは、六ヶ所再処理工場の人が作業できない汚染区域での使用を想定した構成で、遠隔操作可能なロボットアームにレーザー照射ノズルを取付け、光ファイバケーブルでレーザー発振器本体と接続し、3層構造のフィルタを搭載した集塵装置で付着物を剥離し回収する構成である。

図3に示すコンパクトな可搬型システムは、1.5 kgと軽量の照射ノズルを3mの光ファイバケーブルでレーザー発振器に接続し、手で付着物を剥離する構成である。剥離した付着物は集塵装置もしくは家庭用掃除機で回収可能であり、どこでも作業できるような構成である。

各システムのレーザー照射条件(エネルギー密度、幅等)および集塵装置の構成(サイクロン、フィルタ等)は、目的に応じて調整、設定が可能である。

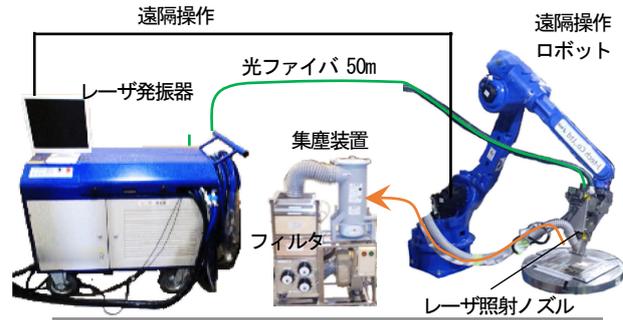


図2 遠隔操作可能なレーザークリーニングシステム

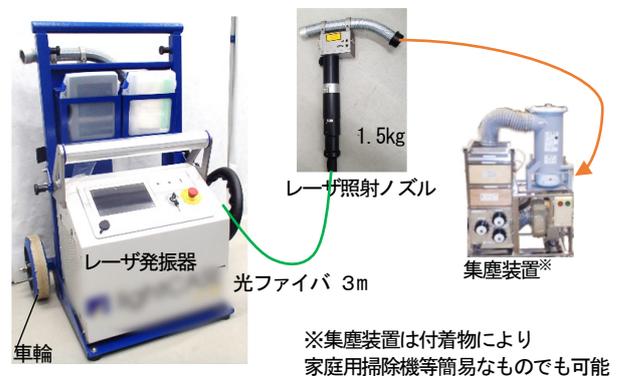


図3 コンパクトな可搬型レーザークリーニングシステム

※集塵装置は付着物により家庭用掃除機等簡易なものでも可能

表1 レーザクリーニング装置能力

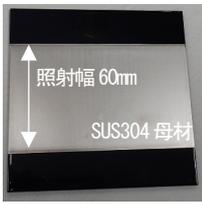
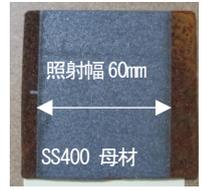
| | 遠隔モデル | コンパクトモデル |
|-------------|-----------------|-----------------|
| レーザー出力 | 350 W | 100 W |
| レーザー波長 | 1060-1080 nm | |
| レーザー照射幅 | 60 mm | 80 mm |
| レーザー焦点距離 | 135±5 mm | |
| パルス周波数 | 12~40 kHz | 199 Hz |
| 寸法(D*W*H) | 770×1,610×1,155 | 480×640×850 |
| 光ファイバ長 | 50 m | 3 m |
| 電源 | 200 V | 100 V |
| レーザー発振器重量 | 350 kg | 49 kg(本体 28 kg) |
| レーザー照射ノズル重量 | 4.0 kg | 1.5 kg |

4. 各種母材に対する剥離能力評価

各種母材の付着物の剥離能力を評価するために、図2に示したレーザークリーニングシステムを用いてSUS304、SS400、コンクリートの試験片に対して剥離対象物質を付着させた試験片を用意し、レーザー照射による剥離状況を確認した[2]。各種試験片の剥離状況を表2に示す。

各試験片の付着物は照射幅60mm、照射速度(5 mm/s)にて概ね母材の表面から剥離された。

表2 レーザクリーニング剥離状況

| 母材材質 | 照射前 | 照射後 |
|--------|--|--|
| SUS304 |  |  |
| SS400 |  |  |
| |  |  |
| コンクリート |  |  |

5. 母材への影響確認

再利用を目的としてレーザークリーニングの適用を考えた場合、母材への影響が小さいことが重要なポイントとなる。そこで、腐食試験、引張試験、ビッカース硬さ試験を実施し、レーザー照射が母材へ及ぼす影響を JIS 規格およびレーザー未照射の試験片と比較し確認した。試験の実施内容および評価項目を表3に示す。

表3 母材への影響確認試験内容および評価項目

| No. | 実施内容 | 評価項目 |
|-----|--|-----------------|
| 1 | 引張試験 ・ JIS Z 2241 に準拠し実施 | ・ 引張強度 ・ 伸び率 |
| 2 | ビッカース硬さ試験 ・ JIS Z 2244 に準拠し実施 | ・ 表面硬さ |
| 3 | 腐食試験 (沸騰 65% HNO ₃ 192h 浸漬) ・ JIS G0573 に準拠し実施 | ・ 腐食度 ・ 表面観察 |

5.1 引張試験

レーザー照射部の引張強度および伸び率を確認するために、JIS 規格に準拠して引張試験を実施した。引張試験条件を表4に示す。

試験は、SUS304 のダンベル型試験片のくびれ部全面にレーザーを10回照射し、万能試験機で引っ張り、引張強度および伸び率についてレーザー未照射の試験片と比較評価した。また、JIS 規格の基準値を満たしているかを確認した。試験片外観を図4に示す。

表4 引張試験条件

| 項目 | 内容 |
|----------|---|
| 試験規格 | — JIS Z 2241 金属材料引張試験方法 |
| 試験片 | 材質 SUS304 規格 13A 号試験片 |
| レーザー照射条件 | エネルギー密度 4.7 J/cm ² レーザー照射速度 5 mm/s 照射回数 10 回 |
| 試験機 | — 500 KN 万能試験機 |
| 評価方法 | 比較基準 JIS G 4305:冷間圧延ステンレス鋼及び鋼帯と比較 比較対象 レーザ未照射の試験片 数値 引張強度、伸び率 |



図4 ダンベル型試験片

5.2 ビッカース硬さ試験

レーザー照射部の表面硬さを測定するために JIS 規格に準拠してビッカース硬さ試験を実施した。ビッカース硬さ試験条件を表5に示す。

試験は、SUS304 の試験板にレーザーを10回照射し、表面のビッカース硬さを測定しレーザー未照射の試験片と比較評価した。レーザー照射した試験片を図5に示す。

表5 ビッカース硬さ試験条件

| 項目 | 内容 |
|----------|--|
| 試験規格 | — JIS Z 2244 ビッカース硬さ試験方法 |
| 試験片 | 材質 SUS304 |
| レーザー照射条件 | エネルギー密度 4.7 J/cm ² 照射速度 5 mm/s 照射回数 10 回 |
| 試験機 | — AVK-C150 |
| 評価方法 | 比較基準 JIS G 4305:冷間圧延ステンレス鋼及び鋼帯と比較 比較対象 レーザ未照射の試験片 数値 ビッカース硬さ |

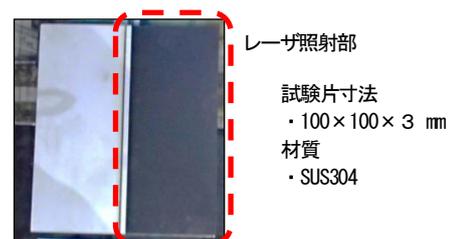


図5 ビッカース硬さ試験片

5.3 引張試験およびビッカース硬さ試験結果

引張試験およびビッカース硬さ試験結果を図6、図7に示す。図6の棒グラフが引張強さ（左軸）、点が伸び率（右軸）を示す。また、図7の縦軸はビッカース硬さを示す。

各試験ともにレーザー照射の有無による測定値の差は非常に小さいことから、レーザー照射によって母材の引張強さおよび伸び率、硬さに与える影響は極めて小さいと考えられる。また、引張強さおよび伸び率はJIS規格の基準値を満たしていることを確認した。[2][3]

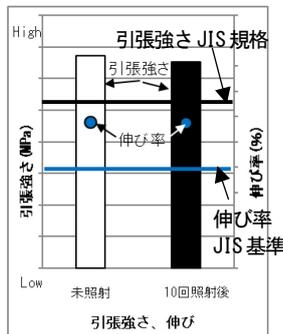


図6 引張試験結果

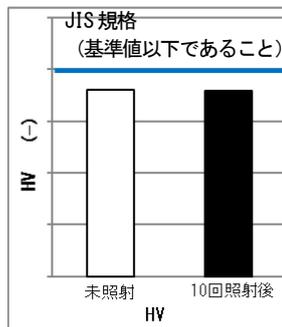


図7 ビッカース硬さ試験結果

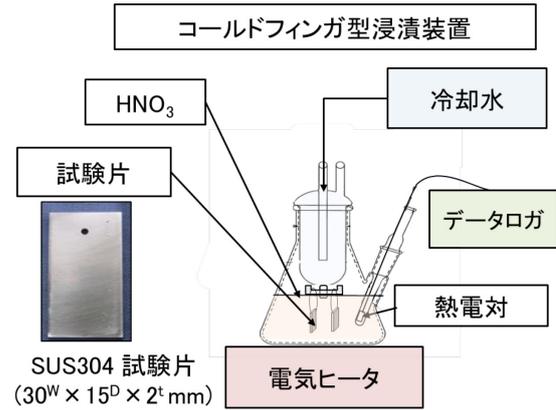


図8 腐食試験構成概要



図9 腐食試験実施様子

5.4 腐食試験

(1) 試験概要

レーザー照射により生じる熱等による影響を確認するためにJIS規格に準じて腐食試験を実施した。腐食試験条件を表6に示す。

試験は、SUS304の試験片の全面にレーザーを10回照射し、その試験片を14.4 mol/Lの沸騰(約123°C)硝酸へ192時間浸漬させ、腐食度および腐食試験前後の表面状態についてレーザー未照射の試験片と比較評価した。腐食試験装置概要を図8、試験実施様子を図9に示す。

表6 腐食試験条件

| 項目 | 内容 | |
|----------|--------------------------------|-----------------------|
| 試験規格 | JIS G 0573 ステンレス鋼の65%硝酸腐食試験方法 | |
| 試験液 | 沸騰 14.4 mol/L-HNO ₃ | |
| 浸漬時間 | 192 h (48h × 4回) | |
| 試験片 | 材質 | SUS304 |
| | 寸法 | 15 × 30 × 2 mm |
| | 表面 | P600 湿式研磨 |
| レーザー照射条件 | エネルギー密度 | 4.7 J/cm ² |
| | レーザー照射速度 | 5 mm/s |
| | 照射回数 | 10回 全面照射 |
| 試験機 | コールドフィンガ型浸漬装置 | |
| 評価方法 | 表面マクロ、マイクロ(SEM)状態腐食度 | |

(2) 試験結果—腐食度

腐食度の比較結果を図10に示す。グラフの縦軸に腐食度、横軸に試験期間を示しており、レーザー照射前後において腐食度の差は非常に小さいことを確認した[2][3]。

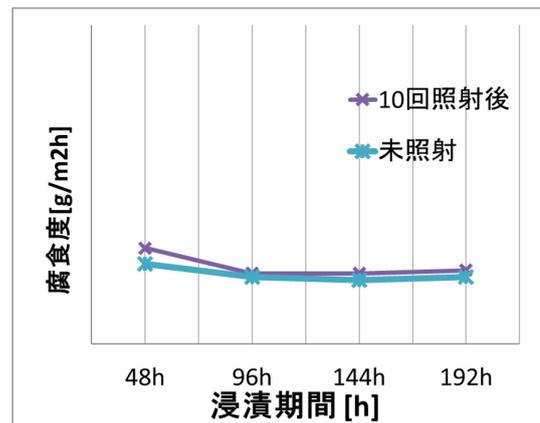


図10 腐食度の比較結果

(3) 試験結果—マクロ・マイクロ観察

レーザー照射した試験片の外観およびSEM-EDXによるマイクロ観察結果を図11に示す。レーザー照射前後の腐食形態は全面腐食であり、鋭敏化時に見られるような結晶の脱粒等明らかな変化は確認されなかった[2][3]。

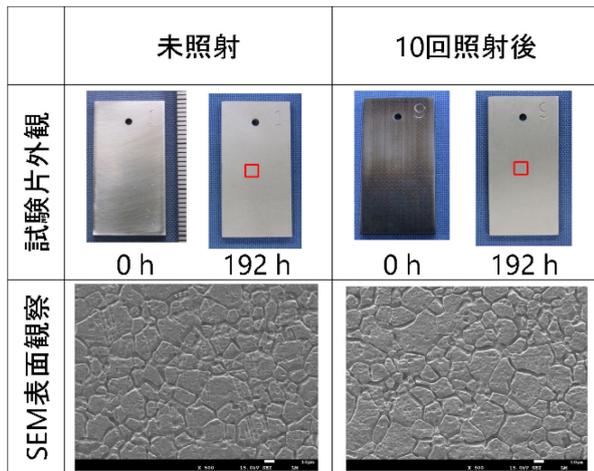


図11 腐食試験のマクロ・ミクロ観察結果

6. まとめ

剥離試験および強度試験ならびに腐食試験の結果より、レーザークリーニングは、各種母材に対する付着物の剥離に対して有効であり、レーザー照射が母材へ及ぼす影響は極めて小さい技術であることが示された。

また、二次廃棄物は、ほとんど剥離した付着物であることから、一般的な薬品やブラストといったクリーニング方法と比較して少なく、工業用の集塵装置または家庭用掃除機等で容易に回収可能である。

当社は、今後様々な場面で期待されるレーザークリーニング技術を、六ヶ所再処理施設における除染のみならず一般産業でのクリーニング適用に向け、更に開発を行っていく。

参考文献

- [1] 野田 静枝、梅津 大輔、他 “六ヶ所再処理工場におけるワイドレーザー除染及び遠隔操作ロボットの適用への取組み”、日本保全学会 第11回学術講演会 要旨集、2012、pp.431-438.
- [2] 市川 友博、野田 静枝、他 “供用中除染へのワイドレーザー適用に向けた取組み(その2)”、日本保全学会 東北・北海道支部第2回保全技術交流会、講演、2017
- [3] 佐藤 結、野田 静枝、他 “放射線環境下におけるワイドレーザー除染技術のご紹介”、ICMST-Tohoku2018 企業展示発表、2018



市川 友博
(株)ジェイテック
プラント保修部 技術統括センター



野田 静枝
(株)ジェイテック
プラント保修部 技術統括センター



佐藤 結
(株)ジェイテック
プラント保修部 技術統括センター