

# 原子力プラントにおける洗浄・除染技術の動向 に関する調査

阿部 勝憲<sup>†</sup>・太田 勝<sup>††</sup>・佐藤学<sup>†††</sup>

## Survey on the Trend of Cleaning and Decontamination Technologies for Nuclear Plants

Katsunori ABE<sup>†</sup>, Masaru OHTA<sup>††</sup> and Manabu SATOU<sup>†††</sup>

### ABSTRACT

The cleaning and decontamination methods have been developed and improved as basic technologies in various industries. These technologies are very important in nuclear industries to clean parts and materials of plant components, to remove radioactive materials from contaminated components and to manage properly radioactive wastes. They are necessary not only for operation and maintenance of nuclear plants but also for decontamination of decommissioned plants.

The cleaning technologies in fabrication industries are explained through basic references in this article. The cleaning technologies for nuclear plants and the decontamination of decommissioned plants are also surveyed by related references, including the decontamination report of FUGEN reactor. The recent development of decontamination technologies using laser and arc-plasma is also summarized.

The possible R&D issues for cleaning technologies based on the various engineering technique at Hachinohe Institute of Technology is introduced.

**Key Words:** *cleaning technology, decontamination, nuclear plants, radioactive materials*

キーワード: 洗浄技術, 除染, 原子力プラント, 放射性物質

### 1. はじめに

洗浄技術は多くの産業に関わる基礎技術として開発・工夫され発展してきた。原子力プラントにおいては、機器・部品・材料の一般的な洗

浄に加えて、放射性生成物の除去あるいは放射性廃棄物の適正な管理に関連して特に重要な技術である。プラントの運転・保守に関わるだけでなく、その廃止措置にも関連する除染技術として重視されている。運転保守においては、作業時の被ばくの低減に大きく関わり、また廃止措置においては放射性廃棄物の適正な仕分けと低減に貢献するからである。

本報告では、まず洗浄の一般的な方法と製造業で用いられる除染技術について概観し、原子力プラントの洗浄処理技術について、基本的な

---

平成 23 年 2 月 28 日受理

<sup>†</sup> 八戸工業大学エネルギー環境システム研究所・教授

<sup>††</sup> 工学部機械情報技術学科・講師

<sup>†††</sup> 工学部機械情報技術学科・准教授

文献により要点を調査した。

次に原子力プラントの除染技術としては、近年重要性が増している廃止措置に係る技術の現状を基本的文献より調査した。廃止措置で適用される主な除染技術を解体前後の対象と方法について整理し、具体例として原子炉「ふげん」の安全性実証試験およびコンクリートの除染技術を取り上げた。

さらに最近の除染技術開発として、レーザやアークプラズマを用いる方法について特徴と主な適用例について調査した。

以上の調査については文献の表現をできるだけ抜粋して引用した。最後に、八戸工業大学における工学基盤研究に基づく洗浄技術開発の可能性についてまとめた。

## 2. 基礎技術としての洗浄

### 2.1 洗浄技術に関する一般的な分類

たとえば、1996年に発行された「最新洗浄技術便覧」では洗浄の基礎と応用技術について総合的にとりまとめられている<sup>1)</sup>。洗浄方法を大別すると、次のように一般的に分類できると

されている。

#### (1)化学的洗浄

溶剤、アルカリ、酸などを用いて汚れを除去する方法で、溶解性を利用するもの、洗浄性を利用するもの、化学反応を利用するものがある。

#### (2)物理的または機械的洗浄

物理的または機械的洗浄によって汚れを除去する方式である。

文献<sup>1)</sup>では、洗浄方法を大別して4つに分類して比較している。これら4つの方法、すなわち溶解性利用、洗浄性利用、化学反応利用、機械的方法、のそれぞれについて、型式または使用材料、方法、用途、利点、欠点、装置材料が具体的に記述され、表にまとめられている。

### 2.2 製造業で用いられる洗浄技術の特徴と課題

#### 2.2.1 洗浄方法の特徴と留意点

製造業においては、種々の対象に対して適切な装置と洗浄剤を用いて表面洗浄が実施されている。それらの方法の特徴と留意点が文献<sup>2)</sup>に整理されているので、参考までに表1に抜粋した。

洗浄液が有効に作用するように種々の方法が

表1 洗浄方法の特徴と留意点<sup>2)</sup>

方法	特徴	留意点
超音波洗浄	キャビテーションの作用で洗浄する。機械的に剥離、洗浄液中に溶解または分散させる。	揺動させて洗浄の均一化を図る。陰になる部分は効果が弱い。
噴流洗浄	ポンプで洗浄液を層中に噴流として供給する。	複雑な形状のものの凹部の洗浄性に難がある。洗浄剤によっては泡の発生が起こる。
揺動洗浄 (回転洗浄)	被洗浄物を上下左右に往復運動させるか、回転運動をさせて、洗浄液との激しい接触を起す。	洗浄物を揺動させる運動機構を必要とする。
機械式 振動攪拌洗浄	槽内の洗浄液を3次元的に激しく乱流攪拌させる。	洗浄剤の特性に合わせて最適な振動数を選定する。
バブリング	洗浄液中にエアを分散噴出させ、できた多数の気泡が液中を上昇する動きで液の攪拌を行なう。	被洗浄物表面が疎水性の場合は気泡が付着して洗浄を妨げる。攪拌効果はあまり大きくない。
ブラッシング	スポンジを回転させて、洗浄液をかけながら被洗浄物表面を擦って洗う。	洗浄面が平坦でないと効果が発揮されない。特定の部位を選択的に洗浄するのに有効な場合がある。
シャワー洗浄	低圧でノズルから洗浄液を滴状にして噴出させ、広い面積を少量の洗浄液で洗い流す	低発泡性の洗浄剤を選定する。引火性のある洗浄剤には適さない。水系洗浄のプレレンスによく用いられる。
スプレー洗浄 ジェット洗浄	高い圧力でノズルから洗浄液を高速で噴射させて洗浄面に当て、汚れを除去する	洗浄力が発揮されるのは洗浄液の直接当たったところ。ビンのような容器内面を洗浄するのに適している。
蒸気洗浄	有機蒸気を凝縮させて付着している汚れを洗い流す。	被洗浄物の温度は低い方がよい。熱容量の小さい被洗浄物には適さない。
真空洗浄	密閉容器内の洗浄液に被洗浄物を浸漬し、容器内を減圧すると被洗浄物の狭い隙間の空気が脱気され洗浄液が侵入する。	減圧、常圧を繰り返す方法を用いることがある。高価。洗浄処理時間は長くなる。

工夫されており、組み合わせる物理的手法により異なる特徴を有する。特に対象物の形状や平坦性が効果に影響する場合がある。超音波洗浄では陰になる部分は効果が弱い、噴流洗浄では凹部の洗浄性に難がある、ブラッシングでは平坦でないと効果が発揮されない、などの点に留意する必要があるとされている。

### 2.2.2 環境問題対応の必要性

特定エタン・フロンの問題から、製造業では商品だけでなく製造プロセスにおいても環境に配慮することが不可欠となっている。特に洗浄工程の管理については日本産業洗浄協議会において評価法などの調査・検討が行われた。参考のために、代替洗浄剤を使用しない技術と代替洗浄剤について、文献<sup>3)</sup>に基づいて要点を紹介する。

#### (1) 代替洗浄剤を使用しない洗浄技術

表2のように、工程の変更、材料の変更、液体洗浄剤を使用しない技術、に分類して工程の工夫と具体例がまとめられている。洗浄剤を使用しない技術では、環境負荷の少ないブラスト材料が選ばれている。特に電子産業では物理的作用を用いる洗浄技術が重視されている。電解洗浄では電解液の選択にも注意が必要とされている。

#### (2) 代替洗浄剤の調査

環境負荷の少ない代替洗浄剤はその化学的組成が多岐にわたっている。オゾン層保護対策産業協議会が調査を行って技術データを整理した結果がまとめられている。

日本産業洗浄協議会においては、代替洗浄剤の従来の分類として、洗浄槽およびリンス槽に水を使用している場合を“水系”，洗浄槽およびリンス槽両者とも水を使用しない場合を“非水系”，洗浄槽では水を使用しないが、リンス槽で水を使用する場合を“準水系”と定義している。日本産業洗浄協議会ではさらにその組み合わせについても新しい分類法を提唱している。

表2 代替洗浄剤を使用しない代替技術<sup>3)</sup>

主分類	工程の工夫	具体例
工程の変更	前工程の変更	転造タップの使用 タップの無給油加工 焼純工程の合理化
材料の変更	新主材料の採用	潤滑性鋼板
	新副資材の採用	無洗浄ブラックス 速乾性加工油
液体洗浄剤を使用しない技術	固体利用ブラスト	ドライアイスブラスト 氷粒ブラスト 小麦澱粉ブラスト プラスチックブラスト
	ウェットブラスト	
	物理的作用の利用	プラズマ清浄 レーザ清浄 UV/O <sub>3</sub> 清浄 イオンエッチング
	電解洗浄	陰極電解洗浄 陽極電解洗浄
	その他	真空洗浄 燃焼 超臨界流体

## 3. 原子力プラントの洗浄処理技術

原子力プラントの洗浄と汚染除去について、安中と竹田により1996年ごろまでに各国でとられた手法を含めて整理されている。そこで紹介されている代表的な表と要点を以下に抜粋して示す<sup>4)</sup>。

### 3.1 除染の必要性

原子力発電炉の運転時間が増すにつれて、原子炉一次冷却系内に堆積する放射性腐食生成物量の増加とともに、点検保守にかかわる作業者の放射線被ばく線量の増大を来したため、各国とも放射線被ばく低減化対策に取り組んできた。また、不要となった原子炉の廃止措置（デコミッションング）のための除染の必要性が生じた。

### 3.2 原子炉汚染クラッドと除染の関係

原子炉一次冷却系内に生成して堆積する放射性腐食生成物はクラッドと呼ばれ、原子炉一次冷却系統機器・配管周辺における作業者の放射線被ばくを受ける放射線源となっている。この放射線被ばくの低減を図り、作業をし易くする

ために、原子炉一次系統配管・機器内面に堆積したクラッドの除去に、主として化学除染が用いられる。

除染対象となるクラッドの性状は、軽水炉でも一次冷却系構成材質、水質条件および原子炉運転状況等を異にする沸騰水型原子炉（BWR）と、加圧水型原子炉（PWR）では大きく異なる。BWRの一次系の主な構成材はステンレス鋼と炭素鋼およびジルカロイであり、主としてステンレス鋼が使用されているため、クラッド組成にFeが80～90%を占めている。一方、PWRはインコネルとステンレス鋼およびジルカロイであり、蒸気発生器（SG）の伝熱チューブにインコネルが多く用いられているため、CrとNiとで60～80%を占める。

また一次冷却系の雰囲気は、BWRの酸化性に対して、PWRでは還元性である。クラッドの特徴は表3に示すように、BWRでは主としてヘマタイト、マグネタイト、ニッケルフェライト等の鉄・ニッケル等の酸化物である。これらは酸化性雰囲気で生成するためFeはほとんどが3価の状態にある。一方、PWRではCr含有量がBWRに比べて高い酸化物が主である。

放射性汚染の主な核種はCo 60で、これらの複合酸化物結晶体に取り込まれているため、除染ではクラッドを溶解除去しなければならない。クラッド中で3価の状態が存在するFe、Ni、Crは難溶性である。

### 3.3 代表的な化学除染プロセス

化学除染法は除染剤使用濃度 1 wt%を境に便宜

表 3 BWR と PWR の 1 次冷却系およびクラッドの特徴<sup>4)</sup>

炉 型		B W R		P W R	
1 次冷却系の特徴	炉水の液性	酸 化 性		還 元 性	
	構成材料の接水面 積 比 率 (燃料棒含む)	ステンレス鋼 炭 素 鋼 ジルカロイ インコネル	38 ～ 42 % 16 ～ 20 % 40 ～ 44 % 1 %以下	ステンレス鋼 ジルカロイ インコネル その他の合金	4 ～ 6 % 25 ～ 28 % 65 ～ 70 % 1 %以下
	ク ラ ッ ド (腐食生成物)	型 態	外 層	$\alpha$ Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (主成分) Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (主成分) NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
内 層			Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (主成分) $\alpha$ Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Fe <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	
化学組成比		Fe 80 ～ 90 % Ni 7 ～ 10 % Cr 1 ～ 10 %	Fe 20 ～ 40 % Ni 25 ～ 60 % Cr 15 ～ 45 %		

上、濃厚溶液法と稀薄溶液法に大別されている。1960年代に開発された代表的除染法であるAP-ACやAP-Citroxは濃厚溶液法で除染効果は高く得られるが、大量の除染廃液を生ずるという欠点を有している。1970代半ば以降にはこれらの欠点を克服するものとして、Can-Deconに代表される稀薄溶液除染法が開発された。

#### (1) 還元溶解除染法

いずれの除染法もクラッドの還元溶解により放射性汚染物質を除去するもので、BWRの系統化学除染にそれぞれ単独に使用されるものである。

#### (2) 酸化／還元除染法

クラッド中のCr含有量の多いPWRの系統除染には 酸化前処理＋還元除染 の二段階除染法が主流となっている。

### 3.4 原子力プラントでの除染の実績

#### (1) 欧米における実施状況

米国における1990～94年の間に化学除染を適用した原子力発電プラントは、BWRで38プラント、PWRで13プラント、合計51プラントに及んでいる。

#### (2) 我が国における実施状況

##### a. 系統化学除染

我が国では原子炉の一次系コンポーネントの化学除染や研究炉・試験炉での系統化学除染は、かなり前から経験を積んできているが、商業用原子力発電炉の一次系統化学除染の経験は、未だ日が浅く、欧米のようにルーチン化するのはまだ先のことと言える。ここでは、二三の実績経験について述べる。

1) 新型転換発電炉「ふげん」の原子炉一次冷却系のKD-203による系統化学除染

2) 浜岡原子力発電所1号炉再循環系統のCORD法による系統化学除染

##### b. 再循環ポンプの化学除染

1) CORD法による再循環ポンプ（PLR）の除染

2) 犠牲電極接触式還元除染によるPLRポンプの除染

- 3) TED-40によるコンポーネント除染
- c. 物理的・機械除染
- 1) PWRの蒸気発生器（SG）の除染
  - 2) 自走式高圧水ジェットによる配管内除染
- d. これからの除染技術〔1996年当時の記述〕

今迄の除染はその大部分が作業員の放射線被ばく低減対策であったが、実用炉のデコミッショニング時代の除染技術、すなわち放射能汚染解体物をそのまま放射性廃棄物にしないで、徹底的にその量を減らすための徹底除染の技術が、要求されるだろう。

今後の原子力発電プラントにおける種々の除染技術の必要性和その多様化は益々重要になってくるものと考えられている。

#### 4. 廃止措置に関わる除染技術

廃止措置に関わる除染技術について基本的な情報をもとに、適用されている主な除染技術について調べ、具体例として「ふげん」の廃止措置安全性実証試験とコンクリート構造物の除染技術についてまとめた。

#### 4.1 廃止措置で適用される主な除染技術

原子力発電所の「廃止措置」に際しての除染は解体作業の段階に沿って行われる。適用される主な除染技術<sup>5)</sup>について、表4のように各段階における適用対象と除染方法が分類されている。

文献<sup>6)</sup>によると原子炉の解体では、対象の機器・配管等に付着している放射性物質を解体の前後において除去する作業が行われる。解体前除染では、解体作業現場の空間線量を下げ、解体作業員の被ばく線量を低減することが主たる目的である。解体後除染では、放射性廃棄物の汚染レベルを低減させることにより、その処理処分を容易にすると同時に一部の廃棄物の再利用を可能にして全放射性廃棄物量の低減を図ることを目的としている。

##### (1)解体前除染

解体前除染は、除染する機器、配管内に化学溶液を循環させ、内表面の汚染放射能を溶出させる化学除染が一般的である。系統全体を除染対象とすることから、解体前系統除染ともいわれる。供用中除染のように材料の健全性に対する厳しい制約がなく、対象物は除染後解体撤去されるので安全が保証される範囲内であれば、汚染機器の母材までも侵食するような除染法も許容される。

表 4 原子力発電所の廃止措置で適用される主な除染技術<sup>5)</sup>

廃止措置の段階	適用対象	除染方法
解体前除染(系統除染) ・作業員の被ばく低減	配管等の除染	・内表面の化学除染 ・外表面の機械式ブラスティング
	プール・タンク	・水ジェット洗浄(ジェット噴流方式) ・塗膜剥離型洗浄(ストリッパ・プルコーティング方式) ・外表面の機械式ブラスティング
解体後除染(機器除染) ・作業員の被ばく低減 ・金属の再利用 ・廃棄物発生量の低減	配管・機器	・化学的電解研磨 ・化学浸漬析出 ・超音波洗浄 ・機械的ブラスティング ・局所的ジェル洗浄
建屋・構造物の表面除染 ・無制限解放 ・放射性コンクリート廃棄物発生量の低減	コンクリート表面	・機械的ブラスティングによる塗装の除去 ・機械式ショット・ブラスティング、シェービングまたはスキャブリングによるコンクリート外層の除去 ・熱的な塗装除去(マイクロウェーブ照射、火炎)

## (2) 解体後除染

解体した機器・配管等のうち放射性物質で汚染しているものは、その後の処理処分を容易にすることおよび放射性廃棄物量を減量することを目的として除染を行う。原子力施設の解体では、多量の解体廃棄物（110万kW級の商用発電炉で約50万 t）が発生するが、このうち約5%が汚染金属廃棄物である。

解体後除染を完了した解体廃棄物は残存した放射能の量に応じて処理処分される。放射能レベルが極めて低くなったものは原子力施設などの限られた場所での再利用が可能となり、残存汚染がほとんど認められない状態（クリアランスレベル）まで除染された廃棄物はスクラップ処分が可能と考えられている。また、再利用レベルあるいはスクラップ化レベルまで除染できなくても、廃棄物の放射能レベルを下げることでその後の廃棄物の管理や処理処分が容易になる。解体後除染では、高い除染係数が要求され、物理的除染、化学的除染および電気化学的除染法が用いられる。

### 4.2 「ふげん」の廃止措置安全性実証試験

原子力施設の廃止措置や、それに伴い発生する廃棄物の安全な取り扱いに役立てるために、「ふげん」（平成15年3月29日運転終了）を利用する安全性実証試験である「試験研究炉等廃止措置安全性実証等（研究開発段階炉の調査）」が以下の項目で系統的に実施された<sup>7)</sup>。

- ・残っている放射能の調査（プラント調査）
- ・放射能を取り除く方法の調査（除染技術調査）
- ・安全に解体するための調査（解体工法調査）
- ・廃止措置に役立つシステムの製作（解体廃棄物管理支援システムの構築）

この中で、除染技術調査は平成16年から平成20年にわたり、施設内の除染状況調査、除染技術の詳細検討・調査、汚染配管と機器類除染試験について行われた。さらに並行して、解体コンクリート予備調査、コンクリートや金属類の再利用調査および実証試験が行われた。

除染技術においては、物理除染（ウェットブラスト法）と化学除染（有機酸法）が調査され、両除染法の実機試料への適用性試験から、実規模の除染設備の検討に供された。これらの調査において各系統について汚染マップ、除染マップが検討された。

### 4.3 コンクリートの除染技術

原子力プラントの解体では、金属に比べてより多量のコンクリート材料を扱う必要がある。コンクリート構造物の汚染レベルは非常に低く、大部分は全く汚染されていない。しかしわずかも汚染が残る場合には内部に浸透する可能性があるが、表面部分の汚染コンクリートを除去すれば、残った建家は一般の構築物と同様に解体ができるとともに、放射性廃棄物の量を減らすことができる。コンクリートの表面除去処理は、金属とは異なり機械的に削ることが主となる。

コンクリートの除染技術については、公開資料で以下のように分かりやすくまとめられている<sup>8)</sup>。汚染コンクリートの除去には、従来、土木・建設の現場で使用されている機器が使用できる。種々の機器や工具を組み合わせることで全体的な除染を行う必要がある。汚染コンクリートの表面の除去には、汚染粉じんの回収措置を施すことにより、従来、土木・建設の現場で使用されているはつり用の機器を用いることができる。汚染がさらに深く浸透している部分には、これらの機器を繰り返し使用するか、ブレーカ等を使用することになる。コンクリート表面は大部分が塗装コーティングされているため、拭き取り除染が可能な部分も含め、汚染の多くは表面層に留まっている。また浸透した場合も通常は1cm程度の表層部に留まると考えられる。

コンクリートの汚染深さの例として、JPDRにおける浸透汚染測定結果の様子を図1に示す<sup>9)</sup>。このように明らかに汚染深さが限定されているのが分かる。したがってこれらの汚染を除くには、表面汚染部については表層部を数mm程度、浸透汚染部については2cm程度の深さをはく離除去すればよい。JPDRでは、建屋解体に先立ち、

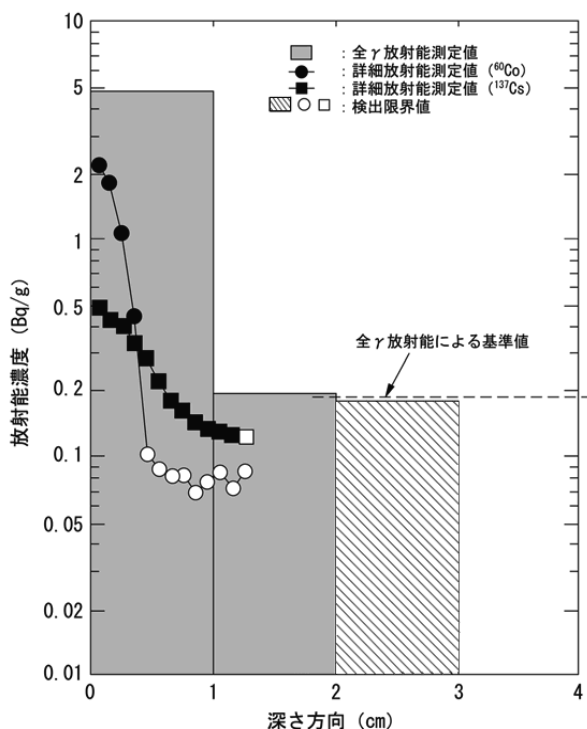


図1 全 $\gamma$ 放射能測定結果と詳細測定における汚染深さの比較 (JPDR)<sup>9)</sup>

汚染調査され、表面汚染には集塵機を装備したショットブラスト、サンドブラスト、スキャブラ、プレーナー等を用い除染作業が行われた。また浸透汚染エリアの除染作業には、コンクリートブレーカー等に手元集塵機を付加して用いられた<sup>9)</sup>。

解体後機器除染は欧米諸国で既に行われてきており、米国ではエネルギー省 (DOE) の原子力関連施設のクリーンアップ活動により行われている。実証試験は、フロリダ国際大学環境技術センター (HCET) や連邦エネルギー技術センター (FETC) などで行われている。

除染したコンクリート構造物のコンクリートガラを再利用する実証試験も行われた<sup>10)</sup>。「ふげん」浄水場のコンクリート60トンの解体物を破砕して、コンクリートを作ったときの粗骨材 (4cm~0.5cmの大きさ)、細骨材 (0.5cm以下) 骨材を用いたコンクリートの特性試験を行った結果、新品の粗骨材 (普通の粗骨材) と同様の品質の再生粗骨材 (高品質) やそれより品

質の劣る再生粗骨材 (中品質、低品質) として再利用できる目処が得られている。これらの共同研究には、八戸工大、福井大、日本原子力発電、敦賀セメントが参加している<sup>11)</sup>。

## 5. 最近の除染技術開発

### 5.1 レーザ除染技術開発

レーザー照射は、表面処理技術として表面硬化、表面アニール、熔融処理、合金形成、被覆処理など多くの分野に用いられてきた。固体表面の洗浄に関連しては、洗浄された面をさらに原子的清浄まで処理することを、洗浄と区別して清浄化と表現している<sup>12)</sup>。半導体デバイス分野では、固体表面の高温加熱による不純物除去の効果を利用してパルスレーザーが清浄化に用いられてきた。

一方、レーザー照射として表面物質を急速に加熱して熔融または蒸発させ (レーザーアブレーション) 洗浄する技術がある。

レーザー照射による除染 (レーザー除染) には、媒体を使用しない乾式プロセスであるため二次廃棄物が少ない、レーザー光はミラーやファイバ等により伝送が可能のため遠隔操作に適している、などの特徴がある。このような特徴を活かし、核燃料サイクル施設等のデコミッショニングに適用する除染技術としてレーザー除染技術の開発が以下のように行われている<sup>13)</sup>。

そこでは表5のように、レーザー照射による除去深さが10  $\mu\text{m}$  以上で熔融堆積物の発生高さが除去深さと比べて十分小さいことを確認して、種々のレーザー条件の中からノーマルパルス YAG レーザを選定している。

ノーマルパルス YAG レーザを用い、レーザー発振器の種類と動作モード、アシストガス種類及び流量、除染深さ、照射エネルギー密度と除染効果との相関を比較評価し、最適化した結果、平面状の対象物に対しては均一にバックグラウンドレベルまで除染できる見通しを得ている。

表5 レーザ選定試験結果<sup>13)</sup>

	CO <sub>2</sub>		CO	YAG			KrF
	CW	N-P	CW	N-P	CW	Qスイッチ	短パルス
除去深さ	○	○	○	○	○	×	×
溶融堆積物	×	×	△	○	△	×	×

○：除去深さ10μm以上，溶融堆積物厚が除去深さより十分小さい（1/2未満）

△：除去深さ10μm以下，溶融堆積物厚が除去深さ以下，1/2以上

×：除去深さ ほとんど見られず，溶融堆積物が除去深さより大きい

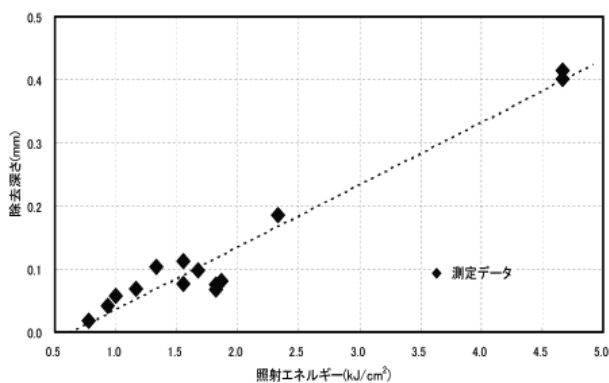
CW：連続発振

N-P：ノーマルパルス

ステンレス鋼表面にパルス照射し，照射前後の重量差から算出された除去深さと照射エネルギーの関係を図2に示す。照射エネルギーが約0.6kJ/cm<sup>2</sup>から金属表面の除去が始まり，レーザ出力の増大にともない除去深さが増加している。実廃棄物除染試験として，放射性廃液の輸送配管材料を用いてバックグラウンドレベルまで除染する条件が調べられた<sup>13)</sup>。

## 5.2 アークプラズマ除染技術開発

アークプラズマは表面処理技術として，蒸着，被覆，イオン注入，加工など多くの分野で利用されている。アークプラズマを減圧下で形成すると金属表面の酸化膜だけを選択的に除去できるという特徴を利用して，電力中央研究所においてアークプラズマ技術の放射性廃棄物処理への適用性の評価，アスベスト廃棄物の無害化・再資源化，放射性金属廃棄物の酸化膜に存在する放射性核種の除去（除染）技術の開発，に関する研究が行われている<sup>14)</sup>。


図2 照射エネルギーと除染深さ<sup>13)</sup>

## 6. 洗浄技術開発の可能性

さまざまな基盤技術を取りいれて原子力に応用できる洗浄技術の開発に向けて，予備的な検討を行った。原子力発電所や核燃料サイクル施設の特色は，膨大な数の部品，材料，使用条件からなる巨大プラントである。その保守，点検は施設の安全性にとり重要であり，経済的な側面も大である。八戸工業大学において研究中の技術シーズを用いて，原子力プラントにおける保守点検および除染のプロセスにおける洗浄が関わる技術の開発について，図3のような課題が考えられる。

具体的には，洗浄技術としてレーザによる酸化膜除去条件と超臨界流体による表面清浄度向上の検討，微粒化技術による高圧洗浄の効率化とミストによる微粉末トラップ効果の検討，また洗浄の効果の評価を廃液側と材料側の両方について行うことにより，廃液と生成物分析によるプラント機器状態推測や保守診断の可能性の検討などである。

## 7. おわりに

洗浄技術は多くの産業に関わる基礎技術として開発・工夫され発展してきた。原子力プラントにおいては，機器・部品・材料の一般的な洗浄に加えて，放射性生成物の除去あるいは放射性廃棄物の適正な管理に関連して特に重要な技術である。プラントの運転・保守に関わるだけでなく，その廃止措置に関連する除染技術とし



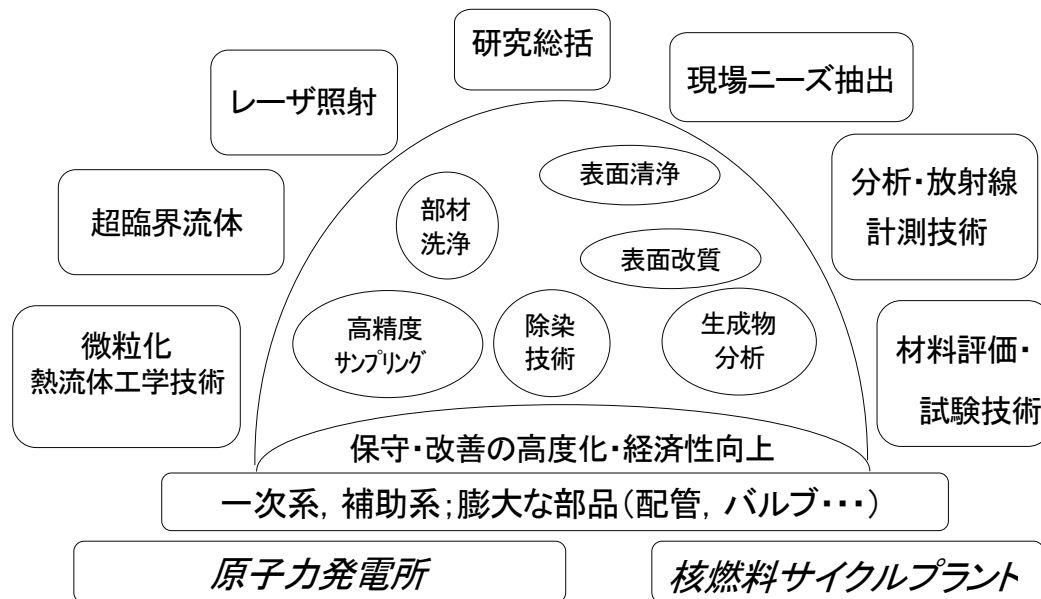


図3 洗浄研究課題

て重視されている。運転保守においては、作業時の被ばくの低減に大きく関わり、また廃止措置においては放射性廃棄物の適正な仕分けと低減に貢献するからである。

本調査は主として、東北放射線科学センター委託研究（平成20、21年度）の支援により行われたものである。また洗浄技術開発の可能性を検討するうえで、八戸工業大学工学部のメンバーからの情報が有益であった。関係者に謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 最新洗浄技術総覧，編集 最新洗浄技術総覧編集委員会，発行 産業技術サービスセンター，初版 1996 年，重版 2005 年，pp.156-157.
- 2) すぐに使える洗浄技術，工業調査会編発行，2001 年，pp.37-41.
- 3) 環境問題に対応する洗浄技術入門，工業調査会編発行，1998 年，pp.42-47.
- 4) 最新洗浄技術総覧，編集 最新洗浄技術総覧編集委員会，発行 産業技術サービスセンター，初版 1996 年，重版 2005 年，pp. 629-639.

- 5) 例えば，原子力安全・保安院ホームページ，第 11 号のキーワード解説（11）.
- 6) 原子力百科事典 ATOMICA，解体関連除染技術（05-02-02-04）.
- 7) 原子力安全技術センター資料，廃止措置安全性実証試験の成果（平成 21 年 8 月 7 日）.
- 8) 原子力百科事典 ATOMICA，コンクリート表面処理技術（05-02-02-05）.
- 9) 宮坂他，日本原子力学会誌，38(7)，1996 年，p564.
- 10) 原子力安全技術センター資料，廃止措置安全性実証試験の成果（平成 21 年 8 月 7 日）.
- 11) 迫井他，「原子力施設の廃止措置により発生する解体コンクリートの再利用技術に関する研究」，日本建築学会学術講演梗概集，A-1 材料施工，2008 年，pp.1221-1222.
- 12) 最新洗浄技術総覧，編集 最新洗浄技術総覧編集委員会，発行 産業技術サービスセンター，初版 1996 年，重版 2005 年，pp.225-230.
- 13) 小川他，「レーザー除染技術の開発」，サイクル機構技法，No.15，2002 年，pp.59-66.
- 14) 古川他，「プラズマを用いた放射性廃棄物の表面除去除染技術の開発」，電力中央研究所報告，研究報告，H（08001）1～15，2008 年など.