技術報告

416. 原子力発電所における小型壁面除染
ロボットシステムの開発藤田 恒昭^{1,*}, 高橋 剛史¹*Development of Small Size Wall Decontamination Robot Systems in Nuclear Power Plants*

Tsuneaki FUJITA and Tsuyosi TAKAHASHI

This paper describes the development of wall decontamination robot systems for nuclear power plants.

In nuclear power plants, it is required to reduce maintenance costs, including annual inspection, repairs and so on. Most of such maintenance activities are actually performed after decontamination processes are completed. In particular, the decontamination process of reactor wells is very important for reducing the radiation exposure of human workers.

In the past, decontamination of reactor wells used to be done by extra large machine and tools, which caused long working hours and tiresome works. It was one of the reasons maintenance costs couldn't have been easily reduced.

There are narrow spaces in the reactor wells that have to be decontaminated by human workers. In order to minimize the radiation exposure to humans, wall decontamination robot systems have been developed.

The decontamination robots have rolled brushes and suction mechanisms and are capable of removing contaminants attached to the wall surface of the reactor wells. By making the robots smaller, it is possible to work in narrower spaces.

In this paper, the effectiveness of decontamination by the developed robots is shown through experiments in the actual nuclear power plants.

KEYWORDS: *mechatronics and robotics, small light, decontamination, nuclear power plant, vacuum, brush*

I. 緒 言

現在, 原子力発電所^{1~3)}における原子炉ウエル(以下, ウエルという)除染および機器貯蔵プール(Dryer Separator Storage Pool, 以下, D/S プールという)除染, 原子炉キャビティ(以下, キャビティという)の壁面除染^{4~6)}を自動化することは, 除染作業者の被曝を極力抑えるためにも重要である。このため著者らは大型の壁面除染ロボットを開発し, さらに実用化に成功した⁷⁾。現在, このロボットを駆使して除染作業を行っている。しかし大型の壁面除染ロボットでは, 装置の設置等の準備作業および後片付けに要する時間のかかり過ぎ, 天井クレーンを使用するために生ずる工程調整, 保管場所を広く確保するために生ずる仮置き場所問題, また, 経済的なコスト高等の問題点がある。加えて除染箇所も D/S プールのキャナル部やコーナ部等の狭隘部があり, これらの箇所は大型ロボットでは除染が困難であり, さらに, キャビティ内はウエル以上に狭く障害物も多く, このため狭隘部の除染は大型ロボットでは不可能であった。このため, 小型でかつ, 高性能のロボットの開発が緊要の課題になっている。また近年, 定期点

検の更なる短縮化およびコスト削減化等の新たな要求が発生しており, これらの諸問題に 대응するために, 本研究において壁面除染ロボットの小型・軽量化の研究開発を行った。

壁面除染ロボットに要求される主な仕様は, ①作業時の安全性, ②被曝の低減, ③除染性能, ④作業の効率化, ⑤コストの低減等である。これらは特に達成しなければならない設計思想といえる。各項目について具体的に述べると次の通りとなる。

①の安全性に関しては, 過吸着時においても走行台車ロボットの転倒の恐れがないことおよび, 異物混入防止対策が十分に取られていることが必要となる。②の被曝の低減に関しては, 放射線防護上, ダストおよびミストの発生が少ないことおよび, 遠隔操作が可能なが求められる。③の除染性能に関しては, 表面汚染密度を放射線管理基準である 0.4 Bq/cm² 以下に容易に下げることができることである。④の作業の効率化に関しては, ロボットによる除染を行った後の, 手除染作業工程をできるだけ少なくするため, ロボットによる除染面積の拡大が可能なことおよび, メンテナンス性が容易であること。また, 壁面に対する吸着性が高く, ロボットの吸着が外れにくいこと等である。⑤のコストの低減に関しては, 経済的で低コストであること等である。

著者らは, 従来からウエル, キャビティ等の極限環境下^{8,9)}での壁面除染ロボットの開発を行ってきており, 今までに開発した壁面除染ロボットは, 国内におけるほとん

¹ 株式会社 技術開発センター(R & D Center, ATOX, Co., Ltd.)

(2003年 11月 7日 受理; 2004年 3月30日 査読通過)

* 著者連絡先: Tel. 04-7145-3330, Fax 04-7145-3649,
E-mail: tsuneaki_fujita@atox.co.jp

どの原子力発電所のウエル、D/S プール、キャビティ等の壁面除染作業で活躍している。

II. 大型除染ロボット⁷⁾の概要

小型壁面除染ロボットの研究開発について述べるにあたり、まず著者らがすでに開発し、実用化した大型壁面除染ロボットの概要を説明する。原子力発電所では年に1回の定期検査が行われる。その際、水を張った状態で使用済み燃料の入替え作業を行うため、原子炉壁面等に放射性物質が付着し、これ以降の炉内での各種作業に重大な影響を与える恐れがある。そこで炉壁に付着した放射性物質を壁面除染ロボットにより、除染することによって作業者の被曝低減と作業効率の向上を図っている。

ウエルおよびキャビティ等の壁面除染作業は主要工程の一つであるため、工程上の遅れが許されない。このため壁面除染ロボットに対する信頼性および精度の向上が要求される。**Fig. 1**にBWR型原子炉におけるD/S プール、ウエル、燃料貯蔵プール(Spent Fuel Pool : SFP)の配置図および除染処理工程の概要を示す。原子力発電所のウエル除染作業は、燃料の交換(Replacement of Fuels)の後、排

Fig. 1 Layout of BWR-type nuclear power plant and Basic process of decontamination

Fig. 2 Large size decontamination robot system

水(Drainage)を行いながら除染処理(Decontamination)が行われる。**Fig. 2**にウエル除染作業中の大型壁面除染ロボットシステムを示す。壁面除染ロボットシステムのシステム構成は壁面除染ロボット、走行台車ロボット、真空ユニット、専用走行レール、制御装置より構成されている。**Fig. 1**で示す除染領域となるウエルおよびD/S プール、キャビティ等に沿ってオペレーションフロア上に専用の走行レールを敷設し、その上に走行台車ロボットを走らせる。壁面除染ロボットは、専用レール上を走行する走行台車ロボットに吊り下げられ、走行台車ロボットと連動して壁面に対し、真空吸着走行しながら吸着盤内に取り付けられたブラシを回転させ、内部・外部散水ノズルからの洗浄水により、壁面に付着した放射性物質を洗い落とす。

壁面除染ロボットを壁面に吸着させるための真空力は、真空ユニットに搭載した大型の真空ポンプにより行われている。壁面に除染ロボットを吸着させることは、吸着盤内に取り付けられているブラシが、壁面に対して一定の圧力で押し当てることが可能となるため、高い除染効果を得ることができる。壁面除染ロボットの中央に楕円形の1個の吸着盤を配置し、その中にディスクブラシ2個を配置すると同時に、効率的な除染ができるよう吸着盤の内側に、散水ノズル4個を配置しブラシに散水するようにした。また、外部にも散水ノズルを配置し、より一層の除染効率を向上させた。また、ひな段の除染は、補助ブラシ2個を除染ロボット両側に設置して除染する構造とした。

壁面除染ロボットの制御系には光ファイバを用いて多くの信号量を伝送する方式を取り入れた。そして、異常故障・運転状況も集中監視盤によって監視できるシステムになっている。除染効率の向上に対しては、吸着盤の中央に吸引口を設け、汚染水を真空吸引し、再汚染防止を図るばかりでなく、砥材入りブラシを使用すると同時に、外部散水を行なうことにより、一層の除染効果の向上が図られ、放射線管理上の基準である放射能レベル0.4 Bq/cm²以下に確実に下げることができた。

しかしながら、著者らが開発し実用化した大型除染ロボットは、FSP キャナル(燃料貯蔵プールとウエルを結ぶ通路)部やD/SP キャナル(機器貯蔵プールとウエルを結ぶ通路)部およびD/S プールの狭陰部、コーナ部等を十分に除染することができない。このことを踏まえ、著者らは原子力発電所におけるウエル、キャビティ、D/S プールの壁面を除染する新たな小型壁面除染ロボットの研究開発に着手した。

III. システムの構成

小型壁面除染ロボットシステムは、壁面除染ロボット、走行台車ロボット、制御盤、手摺り兼用走行レール(横除染時のみ走行レールを使用、縦除染時は専用走行台車を使用)より構成される。

本小型壁面除染ロボットシステムは、**Fig. 3**に示すよ

Fig. 3 Small size decontamination robot system

Fig. 4 SLIM I type decontamination robot

うに、オペレーションフロア上に手摺り兼用レール(横除染時)を設置し、そのレール上に走行台車ロボットを走らせ、壁面除染ロボットと連動させて除染するシステムである。本システムは非常に小型のため従来除染できなかった、ウエル、D/S プール、キャビティ壁面等の狭隘部(チャンネル部や角部)まで広範囲に除染を行うことが可能となる。

小型壁面除染ロボットの除染方向は、壁面除染ロボット

の吊り方向を換える(90°ずらす)ことにより、縦除染(ウエル等のチャンネル部およびキャビティ除染時)および横除染(ウエルおよびD/S プールの壁面除染時)を可能とした。縦除染作業は、小型走行台車に搭載されたウインチの昇降速度と同期させることにより、壁面除染ロボットの円滑な吸着走行が可能となり、効率的な除染作業ができる。また、本研究では小型壁面除染ロボット側面に側面ブラシ(ロール型ブラシ)および側面ブラシ専用吸着盤を設置することにより、側面および壁面の隅々まで広範囲に確実に除染が可能となった。このため、他の作業時においてダストが舞い上がることによる余分な被曝がなくなり、放射線防護上大きな改善が図られた。また、壁面除染ロボットおよび走行台車ロボット並びに吸着機構部を大幅に軽量化したため、天井クレーンを使わずに人手により設置が容易にできるようになった。このため主要工程の調整がなくなり、作業効率が向上し、全体の作業時間を大幅に短縮できた。

Fig. 4 に本研究で開発した小型壁面除染ロボットを示す。また、本ロボットを SLIM (Small light Intelligent Machine) 型と名付けた。SLIM 型除染ロボットは除染幅の違いにより SLIM I 型, II 型, III 型の 3 種類がある。

IV. 要素設計

1. 小型壁面除染ロボットの基本的構成

Table 1 にすでに開発した大型壁面除染ロボットと本研究での小型壁面除染ロボットの比較を示す。大型壁面除染ロボットの場合、ロボット本体の中央に大きな吸着盤が設置されているだけなので、除染作業時において、壁面の凹凸個所にきた時に吸着力が低下する場合がある。このため、小型壁面除染ロボットでは新吸着機構を開発すると同時に吸着性の安定と除染効果の向上を図った。

すなわち小型壁面除染ロボットの基本的構成は、中央部に小型主吸着盤 5 個(標準仕様)および補助吸着盤 2 個を配置した構造設計とした。また、ロボット本体の上下に主ブラシ(ロール型ブラシ) 1 個ずつ配置し、作業エリアの除染面積の拡大を図る設計とした。また、狭隘箇所や SFP チャンネル部壁面の 510 mm, 610 mm 箇所や D/SP チャンネル部壁面の 400 mm, 710 mm 箇所等のチャンネル部側面を除染するために、ロボットの側面に側面ブラシ(ロール型ブラシ) 1 個と側面ブラシ使用時のみ作動する、補助吸着盤 2 個を配置し、吸着走行を安定させる構造とした。これによって吸着盤が真空破壊を起こしても 2 個までであれば、十分に吸着走行が可能である。Fig. 5 に小型壁面除染ロボット(SLIM III 型)の底部平面図を示す。SLIM III 型ロボットは、小型壁面除染ロボットの中で最も大きく、除染幅 600 mm を有しており、2 つのロールブラシの間に中間ブラシを設け、除染残りが発生しないような機構とし、広い面積の除染に対応可能とした。

すでに開発した大型壁面除染ロボットにはインダクションモータを採用したため、全体の質量が大きくなった。そ

Table 1 Comparison between large and small size decontamination robot

Items	Large size decontamination robot	Small size decontamination robot	
	AC-I type	SLIM-I type	SLIM-III type
Dimensions	L: 800 mm W: 1200 mm H: 819 mm	L: 580 mm W: 374 mm H: 115 mm	L: 750 mm W: 700 mm H: 125 mm
Mass (kg)	180	14	42
Suction system	Vacuum pump	Ejector	Ejector
Traveling speed (m/min)	5.1	3.1	4.0
Brush	2 pieces of disk brush 2 pieces of roll brush (hina stage excl)	2 pieces of roll brush	6 pieces of roll brush

Fig. 5 SLIM III type decontamination robot

ここで、小型壁面除染ロボットにはブラシ用モータおよび走行用モータにインナーモータを採用し、極力余分な機構を排除した機構設計にした。このインナーモータは別名モーターローラとも呼ばれ、外側が回転体で内側が固定子となっており、ベルトコンベア等に一般的に利用されている。また、真空発生方式としてエジェクタ方式を取り入れ、それぞれの吸着盤1個当りに付き1個のエジェクタを取り付け、真空ポンプ方式並みの吸着力が得られるような設計とし、かつ、それぞれを独立に動作させたため、仮に2個の吸着盤に真空破壊が生じてもロボット全体の動作に支障はない。

小型壁面除染ロボットの主ブラシおよび側面ブラシにロール型ブラシを配し、モータの出力不足をロールブラシの特性を生かし、ブラシの腹全体を使って除染することにより、大型壁面除染ロボットのディスクブラシと同程度の除染効果を上げることができた。

小型壁面除染ロボット本体の部材は、軽量化を図るため主フレーム構造をアルミニウム合金とした。その他は

Table 2 Comparison between SLIM I, II and III

Items	Small size decontamination robot		
	SLIM-I type	SLIM-II type	SLIM-III type
Brush rotation (rpm)	210	360	360
Amount of air consumption (l/min)	50	60	240
Brush torque (N·cm)	65.7	129.4	129.4
Adsorbability (N)	650	1,210	1,210
Brush width (mm)	300	400	600

SUS304 の部材を使用した。

小型壁面除染ロボットの大きさは、SLIM I型の場合 W374 mm × L580 mm × H115 mm、質量 14 kg (SLIM III 型の場合は 42 kg) となり、大型壁面除染ロボットの 1/4 (SLIM III 型の場合) ~ 1/13 (SLIM I 型の場合) まで軽量化を図った。Table 2 に小型壁面除染ロボットの比較を示す。除染ロボットを小型・軽量化にしたことによるコスト的効果は 1/3 ~ 1/5 となり大幅なコストダウンが図られた。また、全体の作業時間も、1.5 時間程度短縮ができ大幅な改善が図られた。

なお、安全に関する考え方、対策等については、大型壁面除染ロボットと同様の基準を満たしており、安全面について十分に確保されている。

2. 吸着盤

従来開発した大型壁面除染ロボットは、質量が 180 kg と大きく、このため大きな吸着力が必要であったため、真空ポンプによる真空発生方式を採用した。本研究の小型除染ロボットの場合、ロボット本体の質量が大型除染ロボットの 1/4 ~ 1/13 と軽量化したことにより、本除染ロボットの吸着システムは、エジェクタによる真空発生方式を採用することができた。このため、最小型 SLIM I 型の吸着盤の径を直径 50 mm の小型の丸型構造とし、吸着盤1個に対してそれぞれ1個のエジェクタを配置し、個々の吸着盤が独立して駆動できるようにした。SLIM I 型壁面ロボット駆動時の吸着盤1個当りの吸着力は最大で 130 N であ

る。また, SLIM III 型の吸着力は 1 個当り最大で 242 N であり, 十分な吸着力を有している。各吸着盤が壁面の凹凸に対して柔軟に追随できるように, スプリング等の緩衝材を利用したフレキシブル構造とした。特に溶接線の突起部に来るとき, 1 つの吸着盤が真空破壊を起こしても, 他の吸着盤が吸着していることにより凹凸面においても吸着が維持できるようにした。また, 吸着盤の取付け位置をずらすことにより, 溶接線の突起部で 2 つの吸着盤が同時に真空破壊を起こしにくい構造とした。これにより従来と比べ格段の吸着性の向上が図られた。

SLIM I 型の吸着盤の配置写真を Fig. 6 に示す。壁面と接触する部材は壁面との摩擦抵抗を極力低く抑えるため, ネオプレンゴムスポンジを主要部材とした。また, 吸着盤のリップ形状を大きくして, 溶接線箇所の乗り越えを容易にし, 凹凸壁面での吸着性を良くした。吸着盤の構造はネオプレンゴムに MC ナイロンとゴムを接着して, さらに摩擦抵抗を少なくし, 滑り効果を良くするためにテフロン素材を貼り付ける構造とした。

吸着盤は壁面に常時接触しながら, 滑るため傷付き易く, 交換の必要頻度が高い, このため吸着盤の交換を作業者が容易に交換できる構造とした。また, キャナル部の側面を除染する時に安定した吸着状態を維持するために, 除染ロボットの側面に 2 個の吸着盤を設けて, 吸着の安定

化を図った構造設計とした。Fig. 7 に吸着盤の全体図を示す。

3. ブラシ

小型壁面除染ロボットでは作業エリアの除染面積の拡大を図るとともに, 軽量化およびメンテナンスの容易性を得るために, ブラシに新たな工夫を施したロールブラシを用いた。

壁面除染ロボットの上下に 1 個ずつ幅 300 mm (SLIM I 型), (SLIM II 型は 400 mm, SLIM III 型は 600 mm) のロールブラシを配置した。ブラシの除染効果を向上させるため, ナイロンの素材にシリコンカーバイトの砥粒を 30 % 混入したブラシを用いた。この時のブラシの線径を $\phi 0.55$ mm, 長さを 40 mm とした。シリコンカーバイト砥粒の成分構成はシリコンカーバイトが 98.7 % とほとんどを占めている。また, ステンレス鋼等に悪影響を及ぼす塩素および鉄の成分等は, シリコンカーバイト入りブラシの化学分析の結果検出されなかった。

ロールブラシの写真を, Fig. 8 に示すように, インナーモータの表面に 2 分割されたポリプロピレン製の受台に植毛されたブラシを固定するため, インナーモータの表面 2 箇所に回り止めキーを溶接し, キーを挟んでブラシユニットを固定リングで前後を固定する方式になっている。これによりアクチュエータの部品を介することなく, 直接ブラシを回転させることにより軽量化を可能とした。また, ひな段やキャナル部壁面等の狭隙部専用のサイドブラシ幅を 170 mm とし, 主ブラシと同様にインナーモータを採用し, 直接ブラシをモータ表面に設置する機構とした。

ブラシは汚染状況により, 管理区域内での交換作業となるため, 交換時の被曝およびメンテナンス性の容易さを考

Fig. 6 Layout of suction pads

Fig. 7 Sectional view of suction pad

Fig. 8 Halved brush

慮した構造設計が要求される。このため、本ロボットでは、ブラシを2分割にし両端をビスで固定する構造とし、ブラシの脱着を短時間で容易に行えるような構造設計とした。

V. 除染性能の評価試験

1. 試験環境および条件

本ロボットの性能評価のため、加圧水型発電所のキャビティ壁面で除染性能確認試験を行った。本試験ではSLIM I型を使用して、横1 m×縦10 mの領域を除染することとした。そして、横方向300 mm(除染幅)で2列に分け、1列が砥材入りブラシによる除染方式、他の1列が砥材なしブラシによる除染方式として、縦方向は各列1.5 m間隔で5箇所の合計10箇所の壁面を測定点とし、各計測点の表面汚染密度をスミヤサーベイ方式により計測した。この時のスミヤ採取面積は100 mm×100 mmの採取とした。

2. 試験方法

壁面除染ロボットは0.3 m×10 mの領域ごとに上下に移動しながら除染作業を行うこととし、壁面除染作業における1回の上下移動を1往復、さらに3往復までの実験を行った。本ロボットは上下ブラシのカバー部に散水機能を持っており、毎分60 lの散水を行った。本研究では、(1)砥粒なしブラシおよび(2)砥粒入りブラシの2つの条件における除染効果の違いと、除染回数による効果の違いを試験によって求めた。

まず除染する前に採取点ごとに10箇所の計測個所の汚染を計測した。そして各計測個所毎に条件を変えて片道(1回除染)、1往復(2回除染)、2往復(4回除染)、3往復(6回除染)の除染を行い、それぞれの汚染を計測した。

3. 試験結果

Fig. 9に試験結果を示す。本図において横軸は除染回数を表し、縦軸は表面汚染密度を表す。図中の記号●は砥材なしブラシによる表面汚染密度の変化を示し、また、図中の記号○は砥材入りブラシにおける表面汚染密度の変化を示す。

これらの結果より、砥材なしブラシを使用した場合には2～3往復除染を行うことによって放射線管理管理上の基準0.4 Bq/cm²以下に低下させ、砥材入りブラシを使用した場合には、片道(1回)の除染のみで表面汚染密度を0.2 Bq/cm²以下まで低下させられることを確認した。このことは、本研究で開発した小型壁面除染ロボットが、大型壁面除染ロボットと同程度の性能かそれ以上の性能を有することを示している。本試験結果より、可能な限り砥材入りブラシを使用することによって、除染作業時間の大幅な短縮が図れるとともに被曝の大幅な削減が可能であることが確認された。

Fig. 9 Effectiveness of each decontamination method

VI. 結 言

本研究では、小型壁面除染ロボットシステムの構造、走行方式、吸着システム、ブラシ構造について提案しその実用化を図った。

すなわち、小型軽量、横除染、縦除染を基本としたエジェクタ方式による真空吸着システムを構築することにより、吸着性能の向上、除染性能の向上および経済性の追及を図った。また、除染ロボットの小型軽量化を実現させることによって、これが走行台車ロボットの小型化につながり、手摺り兼用レールをあらかじめ敷設しておくことが可能となり、大型ロボットのように、除染作業時にいちいちレールを敷設する必要がなくなった。また、大型壁面除染ロボットと同様に、水抜きと同時に除染作業ができ、大幅な除染作業時間の短縮化が図られた。同時に軽量化されたことにより除染作業前後の準備・後片付けの作業時間が大幅に短縮化された。さらに、除染システムの小型化に伴い、作業者の労力の負担が大幅に軽減化され安全上および被曝の低減化を達成できた。

本研究において開発された小型壁面除染ロボットシステムはすでに実用化され、国内の多くの原子力発電所のウエル・D/S プール、キャビティ等の壁面除染作業で活躍している。

今後は除染作業におけるさらなる効率化および被曝低減化を図るため、ロボットの高機能化を追及する予定である。

— 参考文献 —

- 1) 中山良一, “原子力用ロボット,” ロボット学会誌, 11[1], 81～86 (1987).
- 2) 佐藤秀, 森田弘文, “極限ロボットの壁面移動技術,” ロボット学会誌, 10[5], 581～589 (1992).
- 3) 木村元比古, “原子力用ロボット,” ロボット学会誌, 13[6], 784～787 (1995).
- 4) 浦上不可止, “吸着自走式清掃ロボット,” ロボット学会誌, 10[5], 615～616 (1992).
- 5) 石樽顕吉監修, 原子力施設における除染技術, テクノプロジ

- エクト出版, (1981).
- 6) 藤田恒昭, 吉村英夫, 坂岸光二, 桜井達也, “原子力施設における除染技術,” *J. RANDEC*, **16**, 37~44 (1997).
- 7) 藤田恒昭, 堀江直之, 吉村英夫, 山本純雄, 尾崎功一, “原子力発電所における壁面除染ロボットシステムの開発,” 機械学会論文集, **69**[685], 107~110 (2003).
- 8) 妻木俊道, “危険作業ロボット,” ロボット学会誌, **118**[77], 946~950 (2000).
- 9) 濱田彰一, 間野隆久 “欧米における防災ロボット調査報告,” ロボット学会誌, **19**[6], 678~684 (2001).
-