

「煙突自動除染レンガ解体ロボット」の開発と実用化

西山桂司¹・小林啓二¹・柳楽毅¹

¹正会員 戸田建設株式会社 環境ソリューション部 (〒104-8388 東京都中央区京橋1-7-1)

我々は、煙突の内面に付着したダイオキシン類を均一に効率よく除染できる「煙突自動除染レンガ解体ロボット」(通称:スウィーパーロボ **Swinper Robo=Swing Sweeper Robot**)を開発した。ロボットは噴射ノズルが煙突内径の変化に追従できる構造とすることで噴射距離を一定に保ち、煙突の構造や汚染状況に応じて降下速度や旋回速度を制御プログラムにインプットして自動運転で除染する。さらに、解体用アタッチメントを装着して、ロボットに備え付けたカメラの映像を確認しながら、遠隔操作により煙突内部のレンガを解体することもできる。本文はロボットの概要と、国内の3カ所の煙突解体現場に適用して実用化した内容について述べる。

キーワード: 煙突解体, 高圧洗浄, ダイオキシン類, 自動化, 遠隔操作

1. はじめに

焼却施設の解体工事は、有害なダイオキシン類をとまう作業となる。そのため新しい基準¹⁾(基発第401号)が平成13年4月に公布され、解体作業を行う前にダイオキシン類を含む付着物を除染することが義務づけられた。除染を必要とする設備の中でも特に煙突はダイオキシン類濃度が高く、また高所作業をとまうため、安全に効率よく工事を進める必要がある。

解体されるような古い煙突は、通常躯体コンクリートの内面にレンガを積んだ構造で、まずレンガ内面を除染し、レンガを解体した後、再び躯体コンクリート内面を除染して、ダイオキシン類を完全に除去してから躯体コンクリートを解体する。従来、煙突頂部から吊したゴンドラでの人力作業が主であったが、最近では煙突内を噴射ノズルが回転しながら昇降する機械除染(回転ノズル式、写真-1参照)が一般的になってきた。しかし回転ノズル式は、煙突の下部に行くにしたがい、内径の拡大によりノズル先端と内壁との距離(噴射距離)が大きくなるため、除染効率が落ちるという問題点があった。

そこで我々は、噴射ノズルが煙突内径の変化に追従できる構造とすることで噴射距離を一定に保ち、煙突の構造や汚染状況に応じて降下速度や旋回速度を制御することで、均一に効率よく除染できる「煙突自動除染レンガ解体ロボット」(写真-2)を開発した。さらにロボットは、煙突の除染だけでなく、ア

タッチメントを交換することで、レンガの解体を行うこともできる。

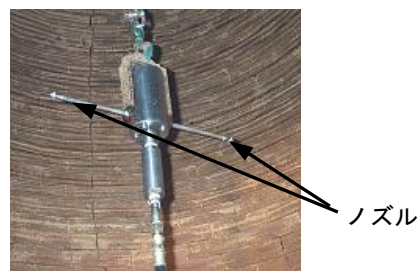


写真-1 回転ノズル式



解体アタッチメント

写真-2 煙突自動除染レンガ解体ロボット

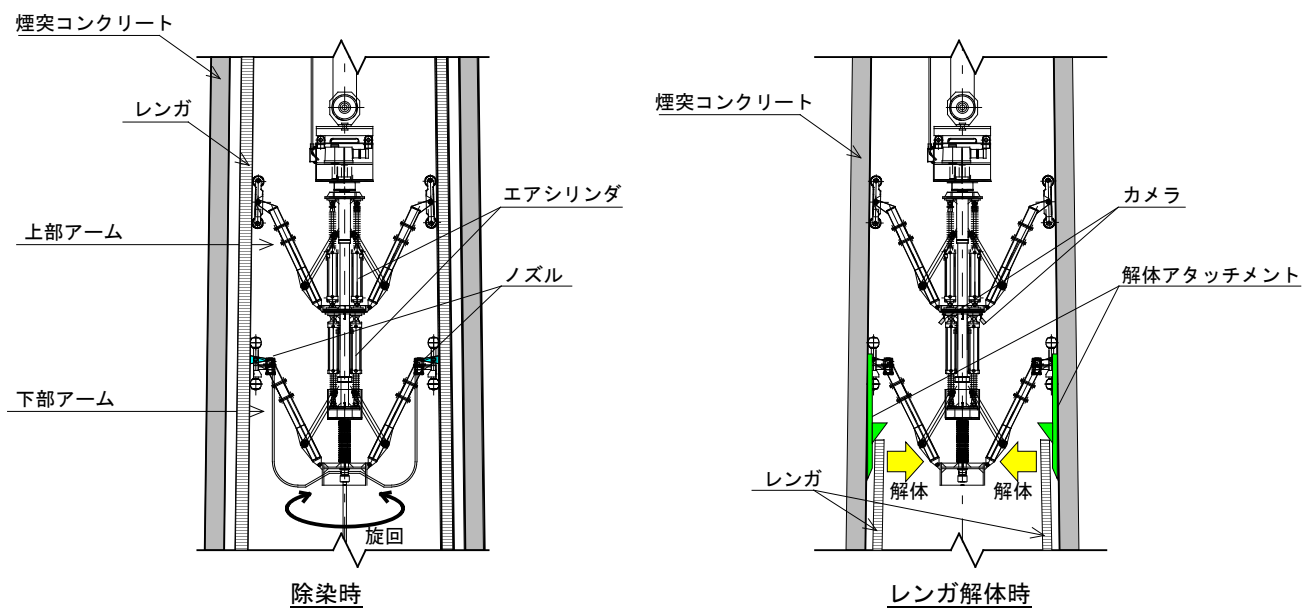


図-1 構造概要

2. ロボットの概要

(1) 構造

ロボットは図-1のような、開閉式の4本の上部アームと2本の下部アームを持ち、煙突内で上部アームを突っ張ることでロボットの安定を保ち、噴射ノズルや解体アタッチメントを装着した下部アームが旋回して除染およびレンガ解体を行う。

構造概要・仕様を以下に示す。

- ①ロボット高 : 3.78m
- ②ロボット重量 : 1.0t
- ③煙突適応内径 : 0.88～3.2m
- ④噴射圧力 : 20～60MPa
- ⑤旋回速度 : 0.2～2.0rpm
- ⑥降下速度 : 4.0～20.0m/min

(2) 全体システム

ロボットは煙突頂部からウインチにより吊り下げ、ロボットの設置撤去時以外はクレーンを必要としない。除染方法は一定の幅（約100mm）を除染しながら180°旋回して降下、反転して180°旋回して降下を繰り返しながら、煙突頂部から下部に向けて除染する。制御方法はあらかじめ降下速度や降下時間、旋回速度と旋回時間を制御プログラムにインプットし、自動で除染を行う。また、ロボットに備え付け

た2台のテレビカメラの映像を確認しながら、地上の操作盤からの遠隔操作も行うことができる。

全体システムを図-2に示す。なお、除染によって発生する洗浄排水は、煙突下部に設置したポンプで原水槽に送り、洗浄水再利用装置等によって処理した後に処理水槽に貯留し、循環再利用する。

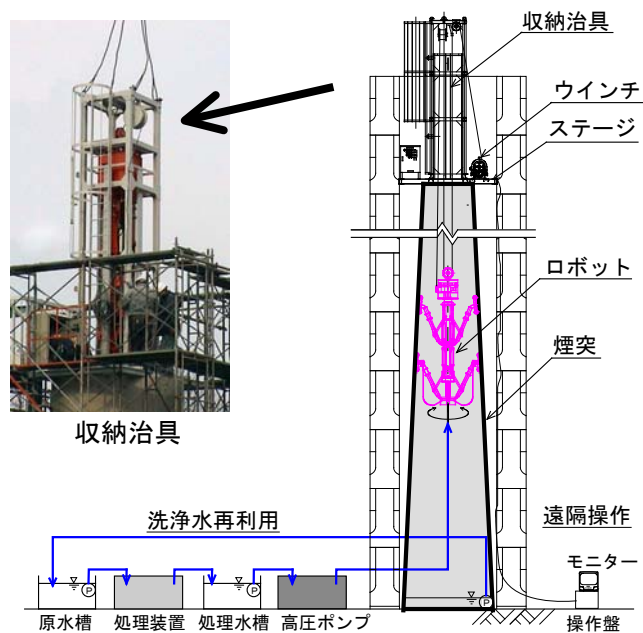


図-2 全体システム

(3) ロボットの設置方法

ロボットの煙突頂部への設置は、収納治具と一体で行う。収納治具はロボットの保管時・搬送時にロボットを保護するとともに、設置・撤去時間の短縮にも寄与している。さらに、収納治具はロボット初期降下時に、煙突頂部での上部アームのガイドとして利用するため、煙突最上部から除染作業が可能となる。煙突頂部への設置状況を図-3に示す。ロボットの総重量は高圧ホース等の付属品も含めて約1tとなり、動滑車を用いて吊り荷重を1/2とし、ステージに設置するウインチは1t吊りを採用している。

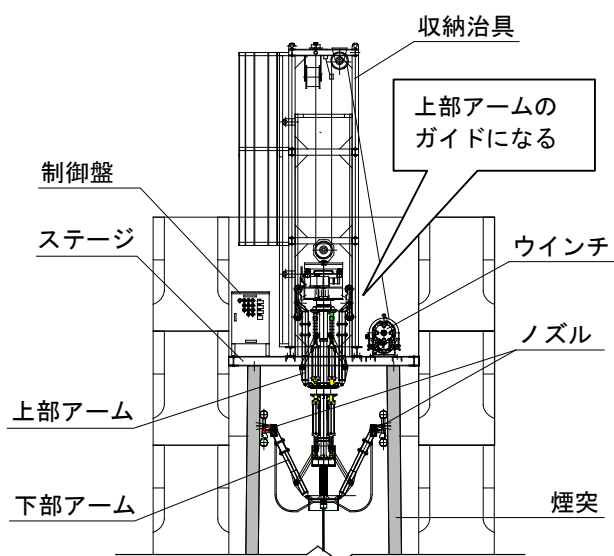


図-3 煙突頂部への設置状況

3. 施工状況

(1) ロボットの開発から現場適用

ロボットは2003年から開発²⁾を始め、2005年3月に当社つくば技術研究所にて模擬煙突を製作して性能確認実験を行った。そして同年9月に千葉県内の焼却炉煙突（高さ21m）に初めて適用し、続いて福岡県内の焼却施設の煙突（高さ45m）に適用、2007年2月には神奈川県内の焼却施設煙突（内筒式、高さ90m、除染のみ）に適用した。以下、それらの施工状況について述べる。

(2) 施工手順

施工手順を図-4に示す。ロボットのカメラ映像を録画機器に記録するため、除染・レンガ解体作業だけでなく施工前後の確認作業なども監督員や作業員が煙突内部に入ることなく行うことができる。

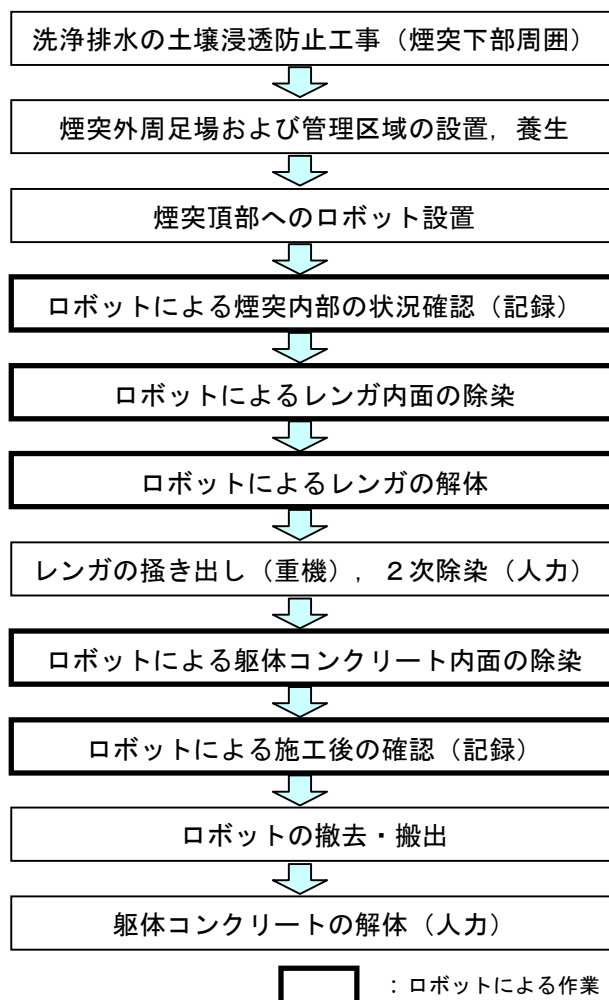


図-4 煙突解体の施工手順

(3) ロボットの搬入および設置

ロボットは収納治具に納めた状態で、4t積トラックで搬送（写真-3）できる。



写真-3 ロボットの搬入

煙突頂部へのロボット設置は、まずステージを吊り上げ煙突天端にアンカーで固定し、続いて収納治具に納めたロボットをステージにボルト固定する。次にウインチを設置後、ロボットを介して収納治具にワイヤーを固定し、ケーブル類を配線してセット完了となる。福岡県内の焼却施設の煙突（高さ45m）を例にとると、ロボットと収納治具重量合計2.0t、必要揚程52m、作業半径15mの条件から揚重機は60t吊りラフタークレーンを使用した。通常、煙突上部に櫓を組む場合は、設置撤去で4日程度を必要とするが、収納治具を用いることで、設置1日、撤去1日の計2日で作業を完了した。

ロボットの設置状況を写真-4に示す。



写真-4 ロボットの設置状況

(4) レンガ内面の除染

除染はあらかじめ設定値を制御プログラムにインプットして自動で行う。ノズル先端と内壁との距離（噴射距離）を大きくすると、高圧水のエネルギーは大きく減少し、確実に除染することが困難になる。逆にノズルを内壁に可能な限り接近させることで、付着物を効率よく除去できる。ロボットは噴射距離を常に 100mm と一定に保つことで、効率のよい除染を可能にしたが、ノズルを内壁に接近させることで除染対象面に高圧水が当たる幅が狭くなり、時間あたりの除染面積が小さくなることが予想される。そこで、ノズルを内壁に接近させても単位時間あたりの除染面積を確保できるよう、エアモーターによりノズルを上下に揺動させている。ノズル揺動角は $\pm 10^\circ$ 、ノズル揺動回数は毎分 200 回、噴射圧力は 20MPa である。高圧水の噴射状況を写真-5 に示す。

ロボットは旋回・降下を自動で行うため、除染開始後は運転監視員が煙突頂部に1人、ポンプ管理および水替え作業員が煙突下部に1人の計2人で作業を行うことができた。また、高さ45mの煙突では1日

でレンガ内面の除染を完了し、除染効率は一日あたり210㎡を達成した。写真-6は煙突下部まで洗浄を行った状況で、洗浄前と洗浄後の違いが目視で明確に判断できる。また、レンガ内面の除染完了後の状況を写真-7に示す。

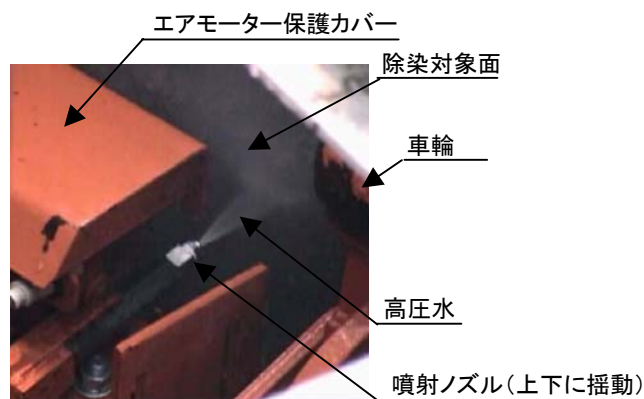


写真-5 高圧水噴射状況

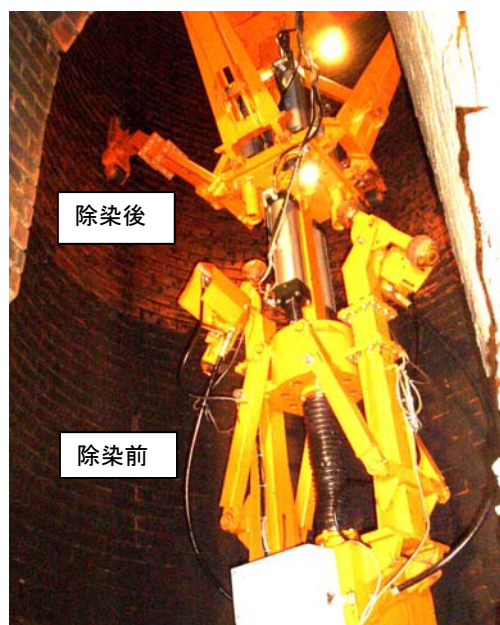


写真-6 除染前後の違い（煙突下部開口部）



写真-7 レンガ内面除染完了
(煙突下部から上部を望む)

(5) レンガの解体

内部レンガ積みコンクリート構造の煙突は、通常レンガと躯体コンクリートとの間に 10cm 程度の空間がある。レンガの解体は上記の空間に解体アタッチメントを差し込み、パールの原理でレンガを煙突内に解体落下させる。操作手順は、常に上部アームを開いた状態で、①下部アームを旋回し位置決定→②下部アーム開く→③ロボット降下→④下部アーム閉じる、となる。このとき③と④の動作により、レンガは解体され煙突内部に落下する。

オペレーターはロボットの動作や解体状況をモニターで確認しながら操作する。操作状況を写真-8に、レンガ解体状況を写真-9に示す。解体効率は1日あたり高さ約15m（70㎡/日）を達成した。

解体したレンガは煙突下部の開口部からバックホウで掻き出し（写真-10）、ハンドガンにより人力で2次除染する。これら作業は、煙突上部と下部での上下作業にならないよう、作業手順を徹底する。

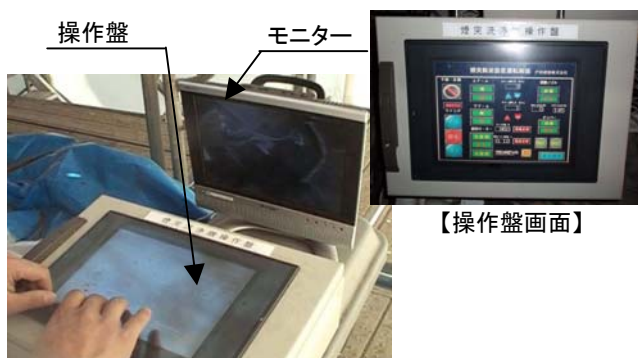


写真-8 ロボット操作状況



写真-9 レンガ解体状況



写真-10 バックホウによるレンガの掻き出し

(6) 躯体コンクリートの除染

レンガを解体後、再びノズルを装着して躯体コンクリート内面を除染する。これにより、ダイオキシン類に汚染された付着物は完全に除去されることになる。除染後の躯体コンクリートのダイオキシン類濃度が 3000pg-TEQ/g 未満（公定法による分析値）になれば、ダイオキシン類の管理区域の解除が可能となり、後工程になる躯体コンクリート解体作業効率の向上に繋がる。

躯体コンクリート除染完了後の状態を写真-11に示す。写真より躯体コンクリート表面の付着物が完全に除去されていることがわかる。なお、除染完了後のダイオキシン類濃度は7.9pg-TEQ/g（事前調査140,000pg-TEQ/g）となり、確実に除染できていることが定量的にも確認された。



写真-11 躯体コンクリート除染完了

4. おわりに

ロボットを適用した現場で、施工効率は実績ベースで除染 1 日あたり 210 m²、レンガ解体 1 日あたり 70 m²を達成した。高さ 45m クラスの煙突であれば、レンガ除染 1 日、レンガ解体 3 日、コンクリート除染 1 日で施工できることが実証できた。従来の方法（除染：回転ノズル式、レンガ解体：ゴンドラによる人力作業）と比較して、施工効率は約 40%向上し、同様に施工費は約 20%低減できた。

国内には休止中の焼却施設は地方自治体の一般廃棄物焼却炉だけで約 600 カ所になり、解体を待っている状態である。今後はロボットの実用化により煙突の除染およびレンガ解体の汎用機として、焼却施設の解体現場に適用していく予定である。

参考文献

- 1)厚生労働省労働基準局:「廃棄物焼却施設内作業におけるダイオキシン類ばく露防止対策要綱」（基発第 401 号）,2001.4.
- 2)西山桂司・安田好伸・柳楽毅・稲井伸介:
清掃工場解体工事における煙突自動除染装置の開発,戸田建設技術研究報告 vol29,2003.