

## 煙突除染ロボット（Penta Claus）の開発と施工適用

谷 雄一\* 田中 靖之\*  
磯貝 哲也\*\* 千田 伝\*  
森 陽介\*\*\* 山尾 憲一郎\*\*\*\*

### 要 旨

近年、廃棄物焼却施設でのダイオキシン類による環境汚染を契機にダイオキシン類対策特別措置法が公布され、これに伴い施設の建て替え工事が多数予定されているが、旧施設の解体工事における作業従事者の曝露事故が大きな問題となり、解体工事における安全な施工方法が求められている。

これらを背景とし、廃棄物焼却施設解体における環境汚染を起こさず作業にも安全な施工技術の一つとして、当社独自の煙突除染ロボットによる工法を開発した。

本ロボットは、ダイオキシン類に汚染された煙突内面の耐火レンガを破砕除去するとともに、RC煙突内壁面の汚染部を切削除去する当社独自の遠隔操作ロボットである。

本年2月本ロボットを清掃工場解体の実工事に適用し、2本の煙突の除染工事をおこなった結果、所期の施工性能および、本工法の有効性を確認した。また施工コストの面でも従来の施工方法に対する有効性が確認され、今後の発展が期待できる結果となった。

### 1. はじめに

近年、廃棄物焼却施設から排出されるダイオキシン類による大気・土壌・水質環境の汚染、さらに周辺住民や施設で働く人間の健康障害が懸念されるようになった。

このため、1999年7月ダイオキシン類特別措置法が公布され、焼却施設の排気ガス・煤塵・排水中の排出量が規制されることになったため、基準を満たさない施設は改造や建て替えが求められている。

建て替え工事では、既存施設の解体を含むが、過年T美化センターの解体工事において作業従事者が高濃度のダイオキシン類に曝露した事故が社会問題となり、解体工事自体における安全性確保が望まれるようになった。

また労働省（当時）からも、この曝露事故防止などに向けた通達が出されたが、これは労働安全衛生規則等に盛り込まれ、2001年6月より施行される。<sup>1)</sup>

これらを背景として、ダイオキシン類に汚染されている施設の解体は、従来方法では施工が困難となっている。

そこで、当社は廃棄物焼却施設解体における環境汚染がなく、作業者に安全な施工方法の開発に取り組み、その一環として、煙突解体に関する技術開発をおこなった。

はじめに、種々の施工方法の比較検討をおこなったが、既存の技術を基にした方法では高濃度に汚染された煙突に対し経済性などに課題があることなどから、遠隔操作ロボット（写真-1）による除染工法を開発した。

この工法を2001年2月より実施工に導入し、施工において計画通りの有効性を確認することができた。

本報ではロボットの開発経緯、ロボットの仕様および施工への適用結果などについて述べる。



写真-1 煙突除染ロボット

\*技術研究所 \*\*環境研究所 \*\*\*土木本部 2010 事業推進室 \*\*\*\*東京支社建築支店

## 2. 施工方法の検討

### 2.1 煙突解体フローの検討

周辺への影響および作業者の安全性を考慮し、以下の3種類の施工方法を検討した。

高圧水除染後、在来工法（重機＋破碎機）解体。

煙突内面に飛散防止剤塗布、原位置で大割、地上の密閉作業室で小割解体。

レンガ・RC内壁汚染部を事前に除去、在来工法（重機＋破碎機）解体。

このなかで、の方法は汚染度が低い場合に有効であり、の方法は煙突の径が大きいと原位置での大割解体の手間が増えるため、比較的の小口径向きであることから、の方法で検討を進めた。

図-1にの施工フローを示す。

### 2.2 ロボットの基本計画

施工フローを基にして、レンガ・RC内壁の汚染部を除去するロボットの基本計画を検討した。ロボットの設計思想、主要機能と作業概要を以下に示す。

#### 2.2.1 設計思想

ロボットはクレーンにて煙突頂部より投入し、吊りながら施工する。

ロボットの操作は地上より遠隔にておこなう。（監視用カメラを装備する）

作業は煙突頂部から下部に向かい、すべての煙突内面を作業可能とする。

#### 2.2.2 主要機能と作業概要

レンガ解体

レンガ、モルタルを破碎し、煙突内部に落下。

汚染部切削除去

煙突内壁を切削し、粉状切削屑は煙突内部に落下。

位置保持

作業反力確保のためロボットを煙突内面に固定。

作業部散水

粉塵防止のため、散水をおこなう。

## 3. ロボット仕様の検討

### 3.1 作業装置の要素実験

レンガの解体装置および壁面切削装置の機構・形状および能力・仕様は、机上検討するとともに要素実験を実施し、この結果を参考に検討をおこなった。

要素実験ではコンクリートブロックとレンガにて作成した模擬煙突壁面を供試体とし、開発するロボットと類似機能を有する深礎掘削機を流用して実験をおこなった。

### 3.2 切削カッターの形式

切削カッターについては、岩掘削あるいはコンクリート切削等種々の既存技術がある。したがってこれらの中

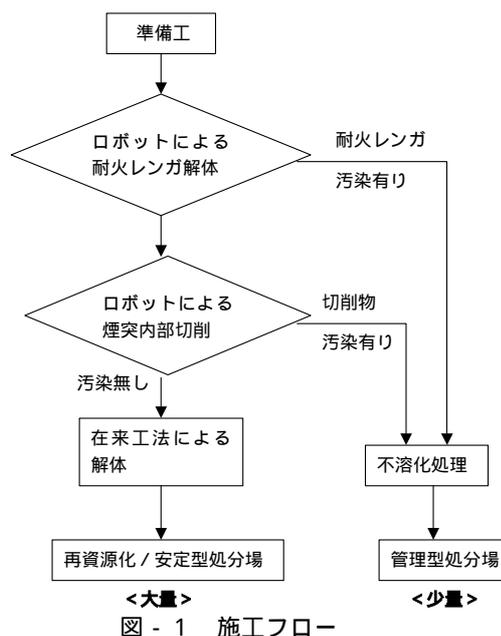


図-1 施工フロー



写真-2 カッターヘッド形状（実機）

表-1 汚染範囲の調査(K工事)

採取場所	表面からの距離 (cm)	ダイオキシン濃度 (ng-TEQ/g)
煙突1上部	0~1	0.07500
	1~2	0.01100
	2~3	0.00100
煙突1下部	0~1	0.14000
	1~2	0.00014
	2~3	0.00003
煙突2上部	0~1	0.13000
	1~2	0.00014
	2~3	0.00002
煙突2下部	0~1	0.12000
	1~2	0.00100
	2~3	0.00046

で本ロボットに適した形式を検討した。

この結果、カッターが左右いずれの巡回方向でも作業が可能なこと、およびロボットのコンパクト化を考慮にいれ、切削反力が小さい垂直回転型ツインヘッドカッターを採用した。写真 - 2 にカッターヘッド形状を示す。

### 3.3 切削深さ

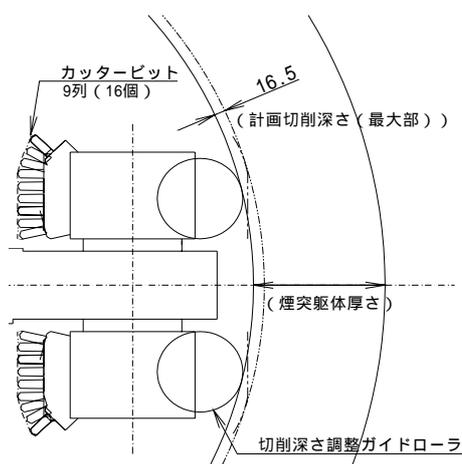
焼却施設の煙突は様々な構造があるが、本ロボットが施工対象としているのは主にRC造による煙突である。

焼却施設稼働時、煙突躯体内壁面とレンガは飛灰が付着することによりダイオキシン等が付着・浸透する。

表 - 1 にK清掃工場における煙突RC躯体の汚染調査計測結果を示す。表に示すようにRC躯体の汚染の影響範囲は、内壁表面から20mm程度の深さまで認められる。

この調査結果を基に余裕代を含め、ロボットの計画切削可能深度を30mmとした。

### 3.4 切削能力の検討



机上にて切削状態をシミュレーションし、この結果と要素実験の状況をあわせ、切削カッターの回転数、巡回速度、切削ビットの数および配置などを決めた。

図 - 2 に切削検討図を示す。汚染部の切削深さは、未切削部に設けたガイドローラーとカッター刃先の位置関係により調整する。

これは、煙突内面が真円とは限らないこと、ロボット自体を煙突の正確な中心に設置することが難しいことなどから、壁面のカーブに倣いながら一定の切削深さを確保するという方法である。平面図にカッター形状とガイドローラー位置および切削深さの関係を示す。

また縦に回転するカッターが円弧状に切削をする為、最小切削深さを確保する為には余堀をすることとなる。

これは鉛直方向の切削ピッチにより変化し、施工能率にも関係する。最小切削深さを5mm、鉛直切削ピッチを125mmとした場合の余堀形状を図 - 2 の側面図に示す。

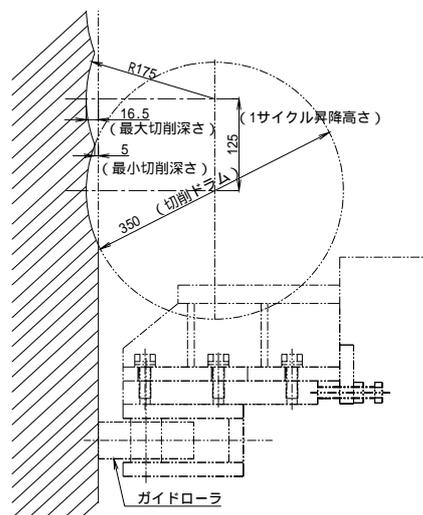


図 - 2 切削状況検討図（平面および側面）

### 3.5 ハンマーの検討

レンガ解体方法については既存例がなく、数例のアイデアを抽出して実験をおこなった。

ハンマー装置は打撃による衝撃をロボット本体に伝えないため、回転する円盤に自由に振れるハンマーアームを2本取り付け付けた形状である。当初はレンガ上方からハンマーを振り下ろし、レンガを破碎する方法としたが、かなりの打撃力が必要であることがわかった。

このため回転方向を逆にし、レンガの側面を打撃することでモルタルの接着を切り、全体を突き崩す方法にした結果、比較的能率よく解体を行う事ができた。

写真 - 3 に実験状況、図 - 3 に実験ハンマーの代表的形状、図 - 4 に実機に採用したハンマー形状を示す。



写真 - 3 レンガ解体実験状況

フリーアーム	丸型		
	横刃 (中心取付)		
	横刃 (先端取付)		
	縦刃		
バネ付アーム	横刃 (先端取付)		
	縦刃		
その他	丸型		
	逆転		
	切削ドラム		

図 - 3 レンガ解体ハンマーの実験形状

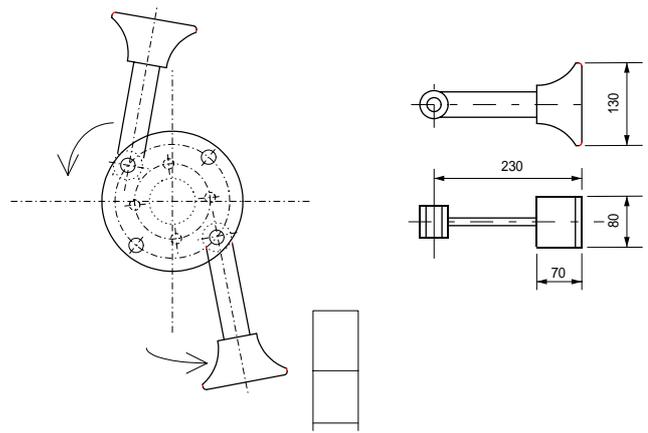


図 - 4 実機ハンマ - 形状

### 3.6 煙突頂部の作業方法

煙突内の作業においては作業反力を煙突内壁からとれるが、頂部の作業の際、作業装置部分をロボット下端に設置するとロボット本体は煙突の上下部となり、把持装置にてロボットを固定することが出来ない。

このため作業装置の設置位置を上にする方法、頂部作業の場合のみロボットを上下反転する方法などを検討した結果、ガイドバーにより煙突頂部を外から把持する方法を採用した。図 - 5 に作業概念を示す。

図の様に頂部では2ステップにてロボットを投入することとなり、煙突上端部からすべてのレンガ解体および壁面切削作業が可能である。

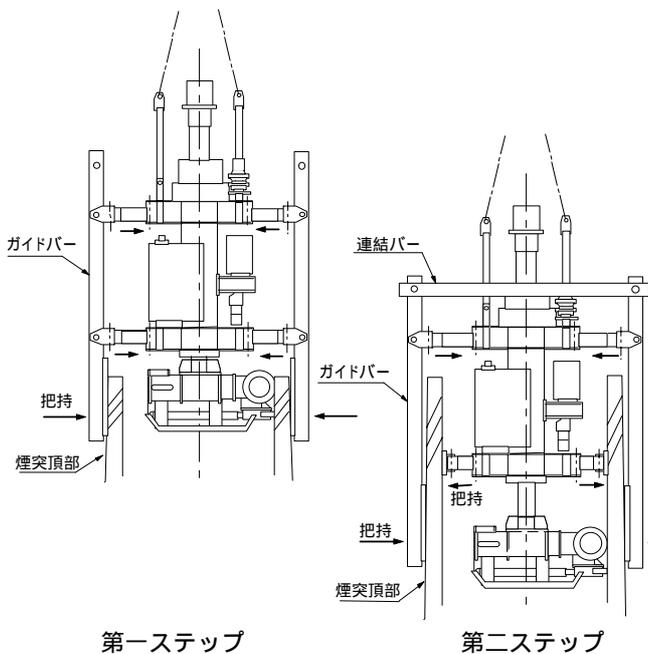


図 - 5 頂部作業概念

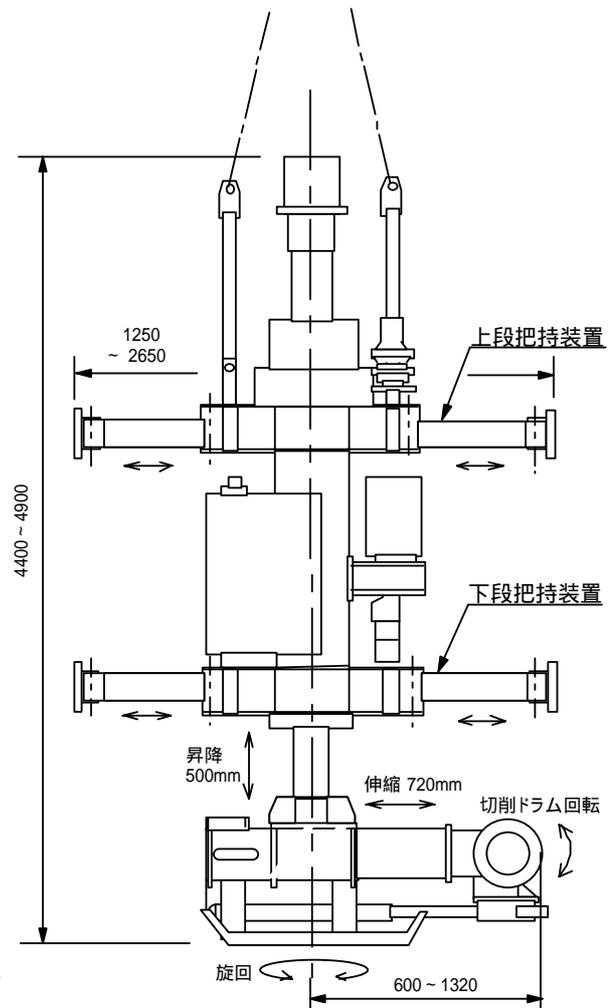


図 - 6 ロボット外形図

### 3.7 製作仕様

実験結果を基にロボットの能力・仕様を決定した。

図 - 6 に外形図、表 - 2 にロボット仕様を示す。

### 4. 施工適用

#### 4.1 工事概要

適用工事の概要を表 - 3 に示す。本工事は清掃工場の建設工事であるが、表には既存施設の解体工事の概要のみ示した。

#### 4.2 煙突の概要

煙突はRC造であり、頂部内径は1号が1350mm、2号が1650mm、また底部レンガ部の内径は1号が2030mm、2号が2000mmである。地上から高さ12m程度までの内面にはレンガのライニングがなされていた。昭和40年代に建設され、休止してからも概ね10年経過したものであったため、煙突上部の躯体は劣化しており、鉄筋の腐食、コンクリートの欠落などが認められた。

#### 4.3 施工設備配置

ロボットによる煙突の除染工法に必要な主要設備を表 - 4 に示す。なお除染後の在来解体工法に関する破碎機などの設備は含んでいない。

この他排水処理施設、集塵機等が必要であるが、本工事には共通設備として設置済みのため割愛した。

ロボット吊上用移動式クレーンはかなり大きいものが必要となっているが、これは煙突の高さから必要となるブーム長さにより決まっており、ロボット重量は前述の仕様を示すように本体が約4t、付属物を入れても5t以下である。図 - 7 に1号煙突施工時の設備配置を示す。

### 5. 施工適用の結果

#### 5.1 実施工程

表 - 3 解体工事の概要

工事名	K市ごみ処理施設(仮称)建設工事に伴う解体工事		
計画概要	ごみ処理施設建設にあたり、敷地内に現存する既設の焼却炉(煙突含む)および付属施設を解体撤去するもの		
工事範囲	解体撤去構造物概要	主な構造	規模
	ごみ焼却処理施設(機械基礎、スロープ、埋設配管、ケーブル等)	RC造、S造	約1500m <sup>2</sup>
	排水循環設備一式		約70m <sup>2</sup>
	煙突(2基)	RC造	H=36, 37m
	計量棟	RC造	約10m <sup>2</sup>
	ポンプ室	S造	約20m <sup>2</sup>
	IDF室	ブロック造	約30m <sup>2</sup>
	外構	アスファルト	約1500m <sup>2</sup>

表 - 2 ロボットの仕様

1	寸法	1250mm × h 4400mm(グリッパ縮時)	
2	重量	約 4000kg f	
3	把持装置(グリッパ)	適用範囲 設置数	1250mm ~ 2650mm 上下2段 × 3アーム
4	作業装置		
	・切削ドラム	ドラム外形 カッター 切削能力 (トルク) 切削深さ	350mm × 幅 480mm 9列-16ビット × 2ヘッド 80rpm max. (280kg・m) 0 ~ 30mm
	・ハンマー	最大打撃軌跡 ハンマー重量 ハンマー数 形状	640mm 5kg(先端) 2本 × 2列 フリースイング
	・旋回装置	旋回速度 駆動方式	0.5 ~ 1.5rpm 油圧駆動
	・伸縮装置	伸縮ストローク 伸縮速度	720mm 0 ~ 1100mm/min
	・昇降装置	昇降ストローク 昇降速度	500mm 0 ~ 500mm/min
5	付属装置	油圧ユニット 監視用TVカメラ 散水ノズル	1式 4基 4カ所
6	操作方式	有線遠隔操作	

2本の煙突の除染工事にロボットを適用した結果、本適用工事規模では、ロボット搬入、煙突2本除染、ロボット搬出までの工程は正味14日間であった。

ロボットによる煙突除染後、引き続き施工した在来工法(重機および破碎機)による解体を含め、煙突2本解体の全工程は22日となった。写真 - 3 に煙突頂部よりロボットを投入している状況、写真 - 4 に操作室内部の状況を示す。また実施工程を表 - 5 に示す。

表 - 4 施工設備一覧

設備名称	仕様・能力	台数	用途、その他
除染ロボット	1250mm ~ 2650mm	1	遠隔操作盤、ケーブルガイド等一式
移動式クレーン	160t レッカー	1	ロボット本体吊上
高所作業車	40m級 - 代用(45t ラフター)	1	ロボット誘導・監視、段取替補助
エンジン発電機	75KVA, 200V	1	作業動力源
高圧洗浄機	40kg/cm <sup>2</sup> × 80 lit/min, 3.7kw	1	作業部散水、ロボット洗浄
コンテナハウス	5.4m × 2.5m	1	操作室

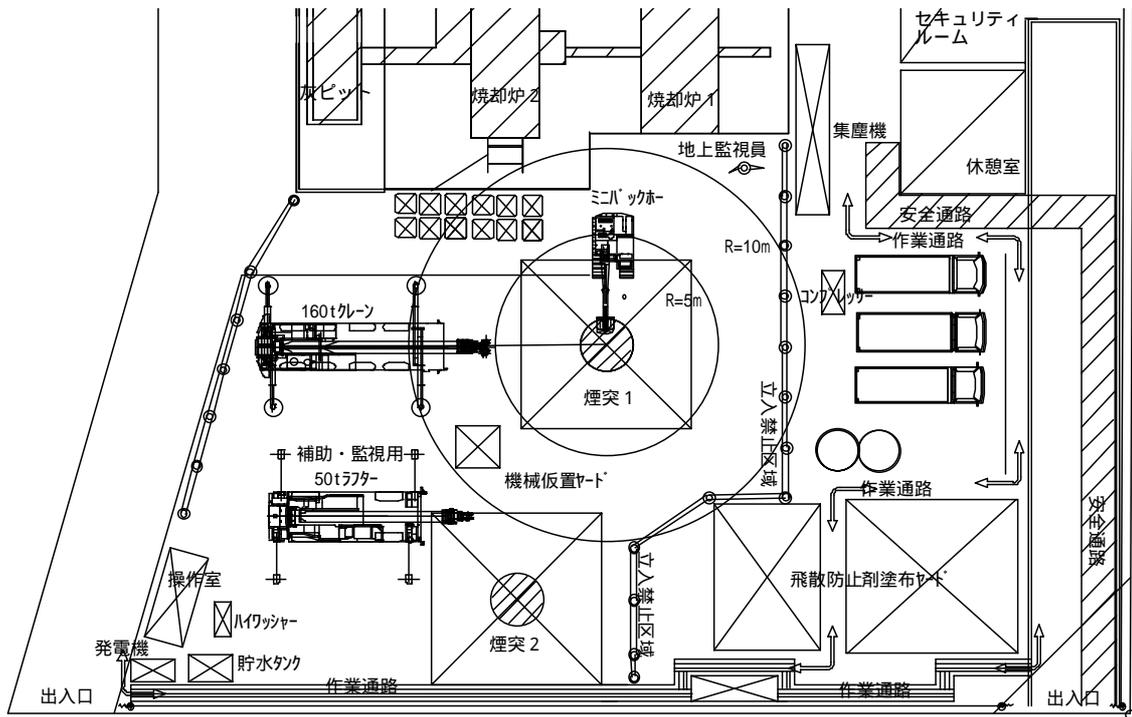


図 - 7 1号煙突施工時の設備



写真 - 4 施工状況 (ロボット投入)



写真 - 5 施工状況 (操作室内)

表 - 5 実施工程表

作業項目	日数	日数																						備考
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
1号煙突		ロボット工法によるレンガ解体・除染														在来工法による解体								
レンガ解体作業			■																					
壁面切削作業				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
重機 + 破砕機による解体																								
2号煙突																								
レンガ解体作業																								
壁面切削作業																								
重機 + 破砕機による解体																								

## 5.2 施工能率の結果

レンガ解体、壁面切削に関して施工結果を整理すると、表 - 6 のとおりとなる。

表に示すように壁面切削における施工能率は、1号煙突で約6.5m<sup>2</sup>/h、2号で9.8m<sup>2</sup>/hとなった。

この違いは1号煙突ではガイドバーを使用し、頂部から切削を実施したが、2号煙突では、頂部に劣化が認められたため、段取り替えに時間を要する頂部の切削をしなかったことによる。

## 5.3 施工品質の状況

ロボットによる除染作業の目的を勘案し、施工品質の確認をする為には、煙突内面が計画通り切削できているかどうかの確認が必要である。今回の施工では主として目視による切削状況確認と、躯体コア抜き箇所での実切削量の確認をおこなった。

表 - 7 に切削量の結果、写真 - 6 に切削面の状況を示す。切削面は切削装置の形状から波状になっている。

## 5.4 経済性の検討

ロボットによる施工の経済性について、作業形態の類似した超高压水洗浄による除染工法を対象に比較をした。比較の対象項目は以下のとおりである。

### ロボットによる除染工法

- ・ロボット工法による施工費
- ・レンガおよび切削した汚染の高い廃棄物の処理費（少量、高コスト）
- ・除染後の煙突躯体の解体廃棄物処理費（多量、低コスト）

### 比較工法（超高压水洗浄による除染）

- ・超高压洗浄装置、吊下ノズル装置による施工費
- ・レンガおよび汚染部分を含んだ煙突躯体解体廃棄物の処理費（多量、高コスト）

表 - 8 に比較結果を示す。表に示すように施工費および排水処理費の合計で費用の規模を比較すると、1.5 対 1.0 でロボットによる工法のほうが低い結果となった。

また解体廃棄物の不溶化処理や最終処分を考えると、この差はさらに開くと考えられるが、これは汚染の程度により処分方法に対する考え方も変わるため、ケースバイケースで比較すべきである。このため、解体廃棄物の処理費と処分費についてはK工事の実績を基に、数量と処分方法のみを表に示した。

## 6. 今後の課題

施工適用の結果、ロボットを使用した本施工方法は概ねねらい通りの結果が得られた。ただし、技術面および現場施工面での課題もいくつか認められた。

### 6.1 切削管理

表 - 6 施工能率

項目	作業距離 (m)	正味作業時間 (h)	平均施工速度 (m/h)	平均施工能率 (m <sup>2</sup> /h)
1号煙突レンガ解体	作業初期に崩落			
1号煙突壁面切削	32.0	29.0	1.1	6.5
2号煙突レンガ解体	16.0	8.0	2.0	12.8
2号煙突壁面切削	28.2	17.0	1.7	9.8

- ・壁面切削時、切削深度は最少部で5mmとした
- ・1号煙突は頂部からの施工の為、頂部ガイド盛替時間含
- ・2号煙突は頂部劣化の為、頂部より7m下位置から切削開始

表 - 7 切削量の確認

項目	厚さ・深さ (mm)				備考
	上	下	右	左	
施工前壁厚	198	218	218	215	
施工後壁厚	172	182	190	177	
切削深さ	26	36	28	38	32 (平均)
計画切削深さ	5 (最小)				

- ・ただし計測は、2号煙突、H = 12mのコア抜き箇所



写真 - 6 内部切削状況

本ロボットでは切削深さは未切削部に接触させたガイドローラーとカッター刃先の位置関係にて設定する様にしたが、切削に関して次に示す課題が抽出された。

煙突内径（曲率）により切削深さが変化する。

未切削部の凹凸と切削カッター部分の凹凸が一致しないと、設定した深さの切削が難しい。

限られたのカッタービットしか切削をしていない。

これらに関して、ガイドローラー方式の見直し、および切削カッター形状について再検討をおこなう。

表 - 8 経済性の比較 (K工事を基にした想定)

比較項目	高压洗浄による除染		ロボットによる除染		備考
工期		14日		12日	
施工費	処理機械、重機、 人件費		処理機械、重機、 人件費		
排水処理費					
使用水量(処理水量)	超高压洗浄水	約570m <sup>3</sup>	実績値	約65m <sup>3</sup>	
分析・不溶化処理費					
レンガ	汚染あり	30m <sup>3</sup>	汚染あり	30m <sup>3</sup>	
コンクリート	汚染あり	80m <sup>3</sup>	汚染なし	-	処理不要
コンクリート切削屑	-	-	汚染あり	2m <sup>3</sup>	
汚染濃度分析		2ヶ所		-	
場内保管期間	分析結果待ち	1月		-	
処分費					
レンガ	管理型処分	30m <sup>3</sup>	管理型処分	30m <sup>3</sup>	
コンクリート	管理型処分	80m <sup>3</sup>	安定型処分	78m <sup>3</sup>	
コンクリート切削屑	なし	-	管理型処分	2m <sup>3</sup>	
費用の比較 (割合)	施工費 + 排水処理費	150	施工費 + 排水処理費	100	

## 6.2 運転操作および現場施工

焼却場の解体工事では施工において管理区分を設定し、これに応じた保護具の着用が必要となっている。

このため、一般の工事に比較すると作業時間はかなり制限され、1日当たりのロボット作業時間は、5.5～6時間程度である。これは作業者のセキュリティームにおける保護具脱着による時間ロスが影響している。

このことは施工費にも影響するため種々の工程の短縮が望まれるが、その一手段としてロボットによる施工においては遠隔操作監視技術の洗練化が考えられる。

具体的には、操作室を管理区分外に置き、時間的制約から解放することで、作業時間の延長をはかる。

そのためには、ロボットのオペレータおよび施工の管理者がロボットの状況をリアルタイムに正確に把握できる監視技術を付加すること、およびロボットがオペレータの意志に忠実に従って作業ができる有効性の高い遠隔操作技術を確立することが必要である。

## 7.まとめ

廃棄物焼却施設解体工事におけるRC造煙突の除染作業に遠隔操作ロボットを開発し適用した。この結果以下のことがわかった。

ダイオキシン類に汚染された焼却設備の煙突は、遠隔操作ロボットによりレンガの破碎解体、内壁面の汚染部切削をおこなうことで、周辺環境および作業者に対し安全な解体ができる。

ロボットは事前の要素実験などを基に能力・仕様を決めて製作し、施工に適用したが、主に切削装置において、改善課題が抽出された。

ロボットによる工法は、経済性においても在来工法より優位であると予想される。

本工法の有効性をさらに高めるには、ロボットの遠隔操作をより洗練する必要があること、現場施工における管理区分の見直しなどによる作業時間の改善が必要であると推察された。

廃棄物焼却施設解体工事の規模および内容は多種多様である。すでに本ロボット工法に続く第二・第三の新規開発課題も抽出されているため、関係者一同引き続き清掃工場解体技術の確立に取り組んでいく所存である。

## 謝辞

本ロボットの開発および現場施工に際しては、公的機関の基準が未確定な中、実際の工事に携わった工事事務所の皆様に多大なご協力をいただき、さらにロボット愛称「ペンタクロース：Penta Claus」を付けていただきましたことを、紙面を借りてお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 「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について」基発第401号の2、厚生労働省、平成13年4月25日