

# 高温域における煙突内部補修装置の開発

## －要素実験と実煙突での実証実験－

### Development of Smokestack Internal Repair System for High Temperature Range - Component Experiment and Demonstration Experiment with an Actual Smokestack -

城井光雄\* 久保田麻里子\*\*

#### 要旨

鉄筋コンクリート造煙突の耐火レンガ層は、熱風および排出ガスに直接接触するため、目地の亀裂やレンガの脱落などの損傷を受けやすい。一般的に用いられる改修方法では、施設の稼働を長期間停止する必要がある。そのため、応急対策として、施設の稼働を停止することなく、耐火レンガの劣化部を吹付け補修する装置の開発を目指し、要素実験および実煙突での実証実験を行った。また、高温域における吹付け材の力学的性能確認も行った。その結果、無線による遠隔操作での吹付け補修を実施する装置を開発することができた。

キーワード：高温域、煙突改修、耐火レンガ、乾式吹付け

#### 1. まえがき

製鉄所施設の鉄筋コンクリート造煙突では、燃料の燃焼にともなう熱風および排出ガスの影響からコンクリートを保護するために、内側に空気層を挟む形で耐火レンガ層が設けられている。この耐火レンガ層は、熱風および排出ガスに直接接触するため、目地の亀裂やレンガの脱落などの損傷を受けやすく、放置すれば、躯体コンクリートが直接熱風等に晒されて、強度低下やひび割れ、鉄筋腐食が進行することになる。また、対象となる煙突は高さ 50m 以上のものが多く、地震や台風による大きな被害の発生が懸念される。

煙突の機能を維持するためには、定期的に耐火レンガ層の劣化状況を診断し、改修を行う必要がある。一般的に用いられる改修方法としては、耐火レンガの張替えや耐火材の吹付けが挙げられるが、どちらも施設の稼働を停止する必要があり、長期間稼働を停止できない施設では、改修を実施することができないのが現状である。

そこで、抜本的な改修を行うまでの応急対策として、施設の稼働を停止することなく、煙突内部の調査を行い、同時に耐火レンガの劣化部を吹付け補修する装置の開発を目指した。

すなわち、本研究では、耐火レンガ損傷部の脱落を防止するとともに、脱落部のコンクリートを排出ガスから保護して、改修時期を延ばすことを目的として「無線による遠隔操作での吹付け補修を実施する装置」の開発を目指した。

本報では、開発において実施した要素実験の結果、お

よび実煙突での実証実験結果について報告する。

#### 2. 装置の開発方針

本装置は、吹付け機械、吹付け材料、動力、無線通信装置等を搭載した耐熱容器を、クレーンで煙突頂部から吊り込み、煙突内部を昇降させながら吹付けを行う。吹付け時は、装置に搭載したネットワークカメラの画像をモニターで見ながら、遠隔操作を行う。また、高温域（200℃）に適用可能とするため、容器を断熱材で被覆し、冷却材を内蔵している。さらにメンテナンスを考慮し、3分割できる構造としている。装置の概略構成を図-1に示す。

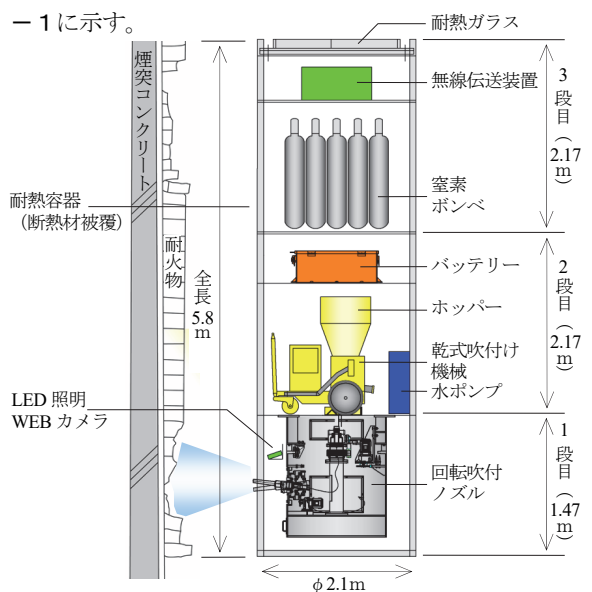


図-1 装置の概略構成

\*西日本支社機電部 \*\*西日本支社土木原価部

### 3. 装置構成資器材の要素実験

#### 3.1 要素実験の概要

本装置に搭載する資器材の仕様を決定するため、高温域（200℃）における装置適用上の問題点を検討し、要素実験を実施した。

本装置の吹付け方式は、煙突の吹付け補修で実績の多い乾式吹付けとし、吹付け機械は汎用機の中から選定した。

#### 3.2 電源システムの構成と動作確認

本装置は、高温域での使用を想定しているため、引火性のある軽油等を燃料とした発動発電機の搭載はできない。そのため、発動発電機に代わり、バッテリーロコで採用されている技術を応用した電源システムの構築を行った。電源システムの概略構成を図-2に示す。

本電源システムは、交流 200V の吹付け機械のモーターを動作させるため、直流電源のバッテリーを使用した。バッテリーによる直流電源 96V（2V×48 個）をアップバーター（DC/DC コンバーター）により 315V に昇圧させて、200V 以上の一定電圧を供給し、DC/AC インバーターで交流 200V に変換する装置をパッケージング化して搭載した。

要素実験では、上記システムにより、吹付け機械の動作確認を行った。一定時間吹付け機械を稼働させ、ローター回転数を測定することにより、発動発電機と同様に正常に稼働することを確認した。

#### 3.3 窒素ガス供給ユニットの構成と動作確認

本装置による吹付け時は、吹付け機械へ圧縮空気を供給する必要があるが、前項の発動発電機と同様に軽油を燃料とするコンプレッサーを搭載することはできない。そこで、コンプレッサーに代わり、不活性ガスである窒素ガスを使用し、窒素ガス供給のパッケージ化と所定流量の確保を行った。窒素ボンベによる吹付け時の概略構成を図-3に示す。窒素ボンベを連結した集合装置に、高压充填（14.7MPa）された窒素ガスを減圧する圧力調整器を接続し、吹付け機械に窒素ガスの供給を行う。集合装置を写真-1に、圧力調整器を写真-2に示す。

要素実験では、上記の構成での吹付け動作確認とともに、吹付け作業に必要な窒素ガスの流量、および供給可能時間の測定を行った。

実験の結果、以下の知見が得られた。

- i. 必要な窒素ガスの流量に適した圧力調整器を選定すれば、窒素ボンベによる吹付けが可能
- ii. バルブ解放時には、一次側圧力（容器内）の低下によって二次側圧力（調整圧力）が降下するため、圧力降下を考慮して調整圧力を設定する必要がある
- iii. 材料吐出量を 0.5m<sup>3</sup>/h とした場合、窒素ボンベ 1 本当たり 1 分間の吹付けが可能

- iv. 断熱膨張による窒素ガスの温度低下により、集合装置の銅連結管等が凍結する可能性がある

#### 3.4 ノズル回転装置の機構と動作確認

本装置では、吹付け仕上がり精度に対応するため、人手による吹付けを行う際のノズルの動きを再現し、円運動をさせながら吹付けを行う機構とした。また、ノズル回転部に、球面接触をする滑り軸受けである球面ブッシュを設けてノズルを回転させ、装置上部からの材料・水等を供給する配管部にスィベルジョイントを設けてドラムを周方向に旋回させる構造とした。

ノズル回転装置を図-4に示す。

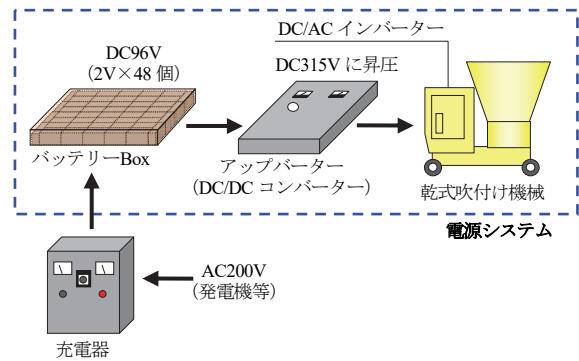


図-2 電源システムの概略構成

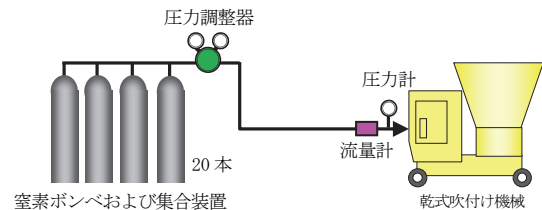


図-3 窒素ボンベによる吹付け時の概略構成



写真-1 集合装置



写真-2 圧力調整器

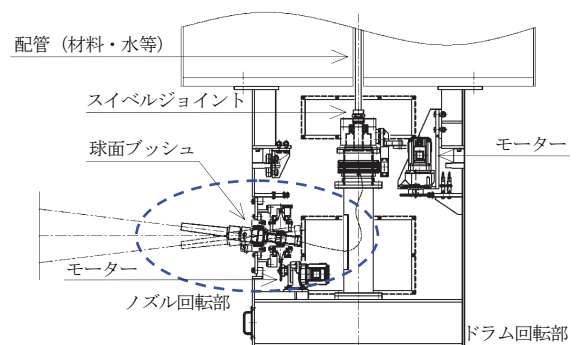


図-4 ノズル回転装置

### 3.5 高温環境下における断熱構造の確認

本装置では、吹付け機械を制御するために電子機器を使用している。電子機器が正常に動作する温度を 60℃とし、煙突内部吹付け時間内 (90 分) はそれ以下に保つことを目標とした。また、本装置は、耐熱容器外周に断熱材を設置し、装置内部にドライアイスを入筒状に配置する断熱構造とした。本装置の内部温度を均一に保つための断熱構造は、熱流体シミュレーションソフトウェア STREAM による装置内部の温度変化の解析により決定された。

要素実験では、200℃を保持した加熱炉の中に耐熱容器を設置し、断熱構造により装置内部温度を 60℃以下に保持できることを確認した。断熱構造実験の概略を図-5に示す。

実験の結果、以下の知見が得られた。

- i. ドライアイス (75kg) を耐熱容器内部に円筒状に配置することで十分な冷却効果が得られる
- ii. ドライアイスの昇華ガスは空気より重く耐熱容器下部に滞留するため、DC ファンにより容器内部温度を均一にする必要がある
- iii. 装置内部温度が低下しすぎるため、水槽、ホッパー、ノズル駆動部の周囲には断熱材を配置し、冷気の伝達を抑制する必要がある

## 4. 高温域における吹付け材の力学的性能確認

### 4.1 性能確認試験概要

本装置の吹付け補修では、耐火性骨材と水硬性セメントまたは化学結合材を混合した耐火物であるキャストブルを使用する。吹付け時の施工温度域は 200℃程度であるが、市場に流通するキャストブルの調査では、仕様として使用可能な材料は確認できなかった。しかし、本装置による吹付け補修は、断熱性能を持たせることを目的としていないため、ここでは主に力学的性能について検証することとした。そこで、200℃環境下で常温硬化型のキャストブルにより吹付けを行って供試体を作成し、常温硬化時との力学的性能を比較した。

### 4.2 性能確認試験項目

吹付け材料メーカーで実施されている管理項目を参考にして力学的性能の確認試験項目を選定した。JIS 規定に準じた試験については (財) 岡山セラミックス技術振興財団に委託した。試験項目および試験方法を表-1に示す。

### 4.3 200℃環境下での吹付けによる供試体作成方法

200℃環境下で吹付けを行うために製作した加熱炉を図-6に示す。加熱炉はロックウールによる断熱構造とし、バーナー差込口を4か所設け、バーナーの本数と火力調整で炉内温度を 200℃に管理した。吹付けノズルは挿入口から、内部に設置した供試体型枠 (30cm ×

30cm) に向けて吹付ける構造とした。吹付け状況を写真-3に示す。

吹付け時の添加水量は、材料メーカー推奨の標準添加量を基に、本装置で使用する乾式吹付け機の機械設定で試し吹きを実施し、添加水量の決定を行った。乾式吹付け機の機械設定を表-2に、添加水量を表-3に示す。

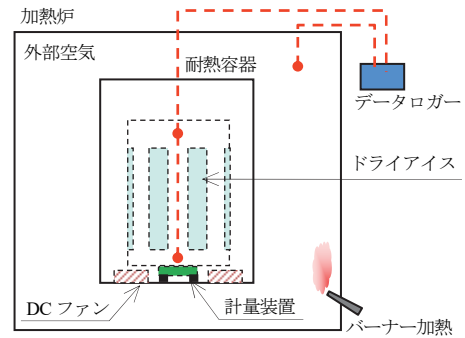


図-5 断熱構造実験の概略

表-1 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	名称
曲げ強さ	JIS R 2213	耐火れんがの曲げ強さの試験方法
圧縮強さ	JIS R 2206-2	耐火れんがの圧縮強さの試験方法
かさ比重	JIS R 2205	耐火れんがの見掛気孔率・吸水率・比重の測定方法

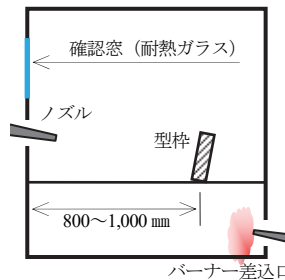


図-6 加熱炉の概略



写真-3 吹付け状況

表-2 乾式吹付け機械の機械設定

項目	単位	設定
材料供給リボルバー回転数	rpm	6.0
材料ライン圧力	MPa	0.05
水圧	MPa	0.7
窒素圧力	MPa	0.6

表-3 添加水量

単位	施工使用量 <sup>※1</sup> kg/m <sup>3</sup>	添加水量			
		標準値		設定値	
		% <sup>※2</sup>	L/min	% <sup>※2</sup>	L/min
材料 A	1,850	12~13	1.8~2.0	12	1.8
材料 B	1,800~1,900	15	1.8~2.0	13	2.0
材料 C	1,830	15	2.3	15	2.3
材料 D	2,000	10~12	1.7~2.0	10	1.7
材料 E	2,000	12~13	1.9~2.1	10	1.6

※1 カタログに記載の 1m<sup>3</sup> 当たりキャストブル材使用量

※2 重量比

#### 4.4 試験結果

性能確認試験結果を表-4に示す。なお、表中の吹付け材料メーカーによる代表値は、常温で硬化させたものの値である。

200℃環境下で吹付けた試験体の曲げ強さ、および圧縮強さの値は、材料 A、B、E では代表値よりも大きな値が得られている。また、一般的な吹付け材料であり、高温時の代表値のない材料 D も他材料と同様な値が得られている。

上記の結果より、常温硬化型のキャストブル材であっても、200℃環境施工時において常温硬化時と同等の機械的性能を有しているものを選択できることが確認できた。

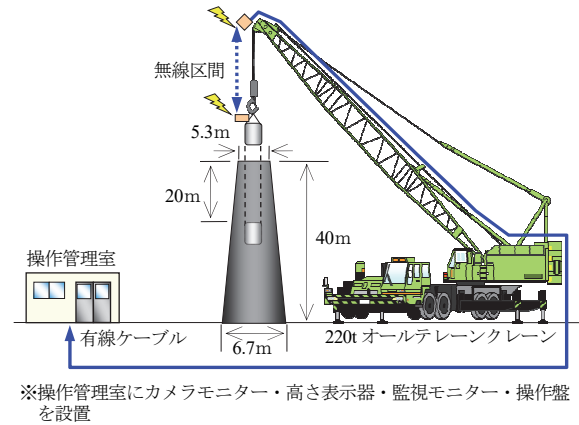


図-7 実証実験の概要

### 5. 実煙突での実証実験

#### 5.1 実証実験概要

運転を休止し解体予定の煙突において、本装置を用いた吹付けの実証実験を行った。運転休止のため、常温環境下での実証実験であるが、以下の項目について確認を行った。なお、吹付け材料には、4章で性能確認試験を行った材料 E を使用した。

- i. 吹付け作業のサイクル
- ii. 装置組立・解体時の作業性
- iii. 無線遠隔操作における操作性
- iv. ノズル回転装置による吹付けの仕上がり状態

実証実験では、吹付け機械、吹付け材料、動力、無線伝送装置等を搭載した耐熱容器を 220t オールテレーンクレーンで煙突頂部から吊り込み、煙突部を昇降させながら遠隔制御により吹付けを行った。また、本装置組立時は 25t ラフタークレーンを使用した。実証実験の概要を図-7に、吹付け装置の全景および実際の吊り込み状況を写真-4、写真-5に示す。また、施工箇所位置および資機材配置状況を図-8に示す。

本装置の仕様は、3章に記載した各要素実験結果を基に選定した。本装置の仕様を表-5に示す。

表-4 性能確認試験結果 (200℃環境下)

試験項目		かさ比重	曲げ強さ N/mm <sup>2</sup>	圧縮強さ N/mm <sup>2</sup>
材料 A	代表値	2.02	3.90	20.10
	測定値	2.04	6.90	28.40
材料 B	代表値	1.85~2.0	7.85	-
	測定値	1.89	8.10	56.40
材料 C	代表値	1.83	1.30	4.20
	測定値	1.93	0.60	5.90
材料 D	代表値	-	-	-
	測定値	2.06	9.80	57.70
材料 E	代表値	-	7.00	45.00
	測定値	2.04	12.00	48.80

※材料 D は、断面修復材のため、耐火材の試験方法に準拠した試験を実施しておらず、代表値は不明



写真-4 吹付け装置の全景および吊り込み状況



写真-5 吹付け装置吊り込み状況 (クレーンカメラ)

5.2 実証実験結果

a. 吹付け作業サイクル

吹付け作業サイクルを表-6に、組立・解体実績を表-7に示す。吹付けサイクルは、1日目（風速0~5m）は1.38時間、2日目（風速5~10m）は1.41時間であった。2日目は、風によるブームの揺れを抑えるために、吹付け装置の投入を一旦停止したことで、前日より作業時間が6分長くなった。しかし、その他の作業内容では1分程度の違いであった。また、窒素ポンベの入替えを1本ごとからユニット（20本/ユニット）ごとに変更することで、計画時よりも0.95時間短縮することができた。

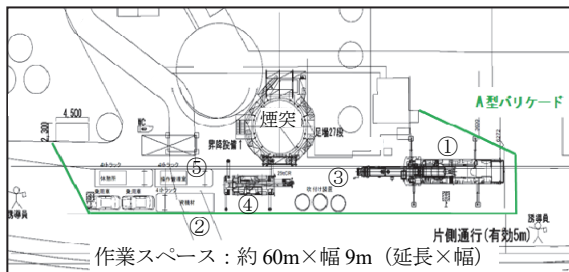
b. 装置組立・解体時の作業性

装置の組立・解体は、施工ヤードの広さや煙突の高さによるクレーン仕様の選定により変化するが、本実証実験では30.6時間を要した。

c. 無線遠隔操作における操作性

実証実験においては、懸念されていた煙突内部環境での吹付け装置の操作信号や映像信号の不具合もなく、操作・撮影および録画が滞りなくできた。

また、吹付け作業におけるモニターの視認性も良好であり、6台のカメラで全周囲を確認することができ、煙突内高さを指定しての吹付け作業も可能であった。吹付け装置に搭載したLED照明およびWEBカメラの設置状況を写真-6に示す。さらに、無線操作（操作盤）および監視状況を写真-7に示す。



- ①：220t オールテレーンクレーン
- ②：材料、工具
- ③：吹付け装置（仕様は表-5参照）
- ④：25t ラフタークレーン
- ⑤：ハウスカー（吹付け操作室）

図-8 施工箇所位置・資機材配置状況

表-5 装置の仕様

吹付 機械	使用ベースマシン	アリバ吹付け機 (型式：Aliva237V)
	吐出能力	0.5m³/h (max 1.1m³/h)
	所要窒素圧力	0.6MPa
圧縮ガス供給量 (吐出量)		7m³×20本 (2m³/min)
添加水水槽 (吐出量)		タンク 90L (ポンプ 1.6L/min)
材料ホッパー容量		0.262m³ (14袋)
耐熱 容器	外径、寸法	φ2.1m,H:2.2m×2基,H:1.4m×1基
	自重	内部機器を含む総重量 8.91tf
	耐熱構造	ドライアイス、マイクロサーム ファイブランケット

表-6 吹付け作業サイクル

	作業内容	計画 (分)	実績 (分)	
			1回目風速 0~5m	2回目風速 5~10m
①	窒素ポンベ集合 装置入替え	30	10	9
②	耐火材料投入	20	21	20
③	吹付装置投入	30	20	26
④	吹付時間	30	27	26
⑤	吹付装置取出し	30	5	4
	吹付サイクル 合計	140 (2.33時間)	83 (1.38時間)	85 (1.41時間)

表-7 組立解体実績

作業内容	実績(分)
機器搬入	90
吹付け装置組立	330
220t クレーン組立、機器設置	470
試験吹き、アリバ調整	170
煙突内部吹付け前状況撮影	10
煙突内部吹付け後状況撮影	25
220t クレーン解体、搬出	160
吹付け装置解体	160
資機材搬出	420
合計	1,835 (30.6時間)

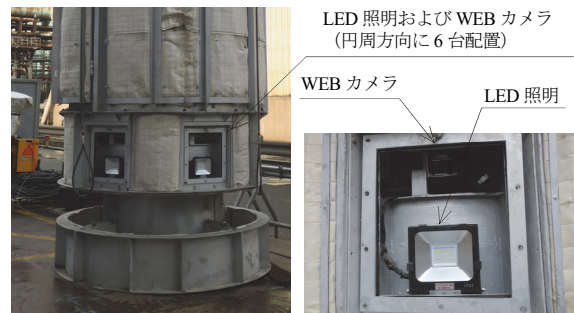


写真-6 LED照明およびWEBカメラの設置状況



写真-7 無線操作（操作盤）および監視状況

吹付け材料のリバウンドは、煙突上部と下部の開放による空気の流動効果もあったので、煙突内部に滞留することはなかった。また、モニターによる吹付け作業は、カメラへの吹付け材料のリバウンドの付着もなく、映像の視認性は良好であった。事前に模擬煙突で実施した無線遠隔操作による吹付け状況を写真-8に示す。

d. ノズル回転装置による吹付けの仕上がり状態

1日目および2日目の吹付実験結果を表-8に、2日目の吹付け面の仕上がり状態を写真-9に示す。吹付け時にはクレーンブームの揺れによって、吹付け装置に最大50cm(両振幅)の揺れが生じたため、一定の吹付け距離を保てない状況があったが、遠隔操作には問題なく、吹付けの仕上がりにはさほど影響しなかった。

また、1日目と2日目の吹付け面積の違いは、原因としてノズル回転の制御方法の違いが挙げられる。すなわち、ノズル回転を自動制御で行った1日目は、ノズルを5度および10度の角度で水平に振幅させることが可能だが、目標の吹付けエリア内に吹付けする際に、微妙な角度調整ができず、吹付け範囲が目標よりも大きくなったと考えられる。



写真-8 無線遠隔操作による吹付け状況 (模擬煙突)

表-8 吹付実験結果

日時	規定高さ*	吹付け作業時間	風速	装置の揺れ	ノズル回転	吹付け面積
1日目	20m	14:10~14:38	0~5m	20~30cm	自動	3.76m <sup>2</sup>
2日目	1.5m	10:44~11:11	5~10m	50cm	手動	2.26m <sup>2</sup>

規定高さ\*: 吹付け装置ノズルセンターのGLからの高さ



写真-9 吹付け面の仕上がり状態

また、目標厚さ50mmに対して、モニター目視での吹付けでは厚さが50mmより薄く、むらが生じる結果となった。したがって、自動制御は煙突内部全周や軽度なひび割れを広範囲に補修する場合にのみ適応可能と考えられる。

一方、ノズルの回転を手動制御で行った2日目は、ノズルを任意の角度に設定できるので、目標の吹付けエリア内で吹付けができ、吹付け厚さも目標厚さ50mm以上を確保することができた。したがって、手動制御はレンガの脱落部等特定した場所を補修するのに適応可能と考えられる。

目標厚さ50mmに対しての仕上がり状態については、均一な厚さにするための不陸の修正は難しかったが、ノズル回転を手動制御することにより、目標厚さ50mm以上の厚さを確保することができた。

6. まとめ

これらの実験を行った結果、「無線による遠隔操作での吹付け補修を実施する装置」を開発することができた。均一な吹付け厚さの確保においては、吹付け装置の自動制御による吹付けの仕上がり状態の向上に課題は残されているが、手動制御による吹付けではモニター映像による吹付け作業の習熟により、改善されると考えられる。

7. あとがき

既設煙突は、老朽化のため今後も増大が見込まれる社会資本と同様に維持・更新の時期を迎えている。しかし、煙突を補修するには、操業を一旦停止する必要があり、生産性に大きな影響を及ぼす課題が残されていた。

本装置を適用することで、煙突を使用したまま補修することができ、操業を停止することなく、延命に寄与することが可能となる。

今回、煙突補修装置の全体構成は開発することができたが、外気風速によりクレーン本体が影響を受けることなどもわかったため、荷ぶれ制御や、モニター技術の改善による吹付け出来形の向上などの課題に対しても、今後継続して取り組んでいきたい。

なお、本開発は、日本製鉄株式会社との共同開発の成果である。

【参考文献】

1) 城井光雄、丸山宣男、小林淳二、「高温域における煙突補修装置の開発」、建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集、pp.143~148、2020