

高温域における煙突補修装置の開発

— 高温域煙突内部吹付装置 —

○(株)奥村組 城井光雄
日本製鉄(株) 丸山宣男
日本製鉄(株) 小林淳二

1. はじめに

製鉄所施設の鉄筋コンクリート造煙突は、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、内側に空気層を挟ん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。対象となる煙突は高さ50m以上のものが多く、地震や台風により大きな被害が発生することが考えられる。

煙突の機能維持のため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、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る、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。

このような現状から、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、煙突内部調査に併せて耐火レンガの劣化部を吹付補修する装置の開発を目指した。

本開発は、コンクリートの劣化進行を抑制して、改修時期を延ばすため「無線操作による遠隔操作での吹付補修を実施する装置」を開発することを目的とする。

本報では、開発におき実施した要素試験の結果および実煙突での実証試験結果について報告する。

2. 装置の開発方針

本装置は、吹付機械、吹付材料、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°C)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。

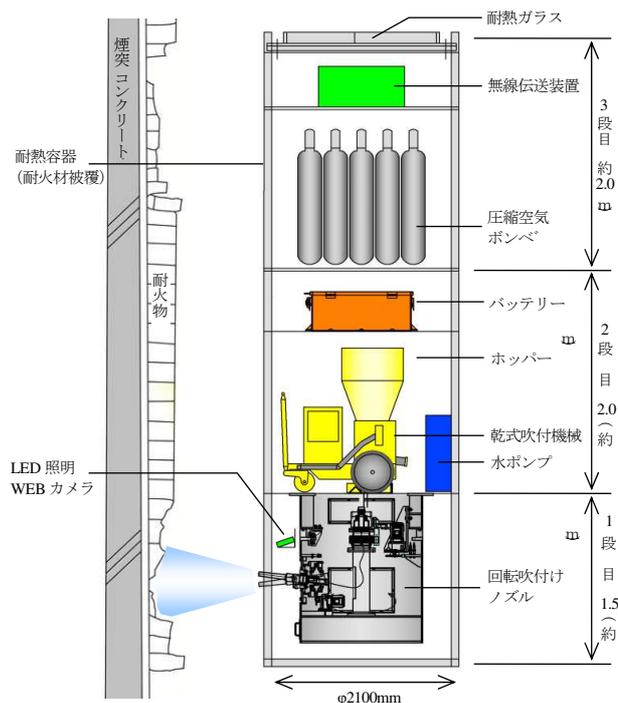


図-1 装置の概略構成

3. 装置構成資器材の要素試験

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°C)における装置適用上の問題点を検討し、要素試験を実施した。

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

3.1 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。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の吹付機械のモーターを動作させるため、直流電源である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(DC/DCコン

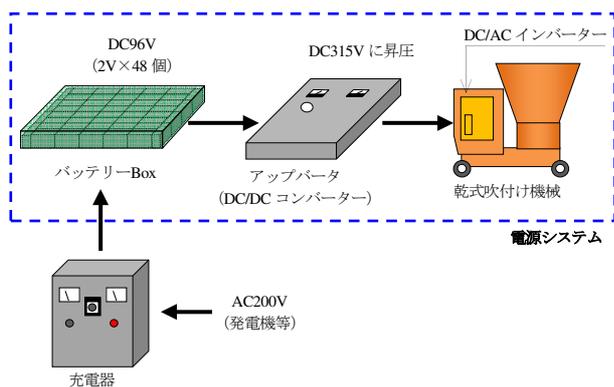


図-2 電源システムの概略構成

バータ)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。

要素試験では、上記システムにより、吹付機械の動作確認を行った。一定時間吹付機械を稼働させ、ローター回転数の測定により、発動発電機と同様に正常に稼働することが確認できた。

3. 2 窒素ポンベによる機械構成と動作確認

本装置による吹付け時は、吹付機械へ圧縮空気を供給する必要がある。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。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、エア供給のパッケージング化と所定流量の確保を行った。窒素ポンベによる吹付け時の概略構成を図-3 に示す。窒素ポ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。

要素試験では、上記の構成での吹付け動作確認とともに、気体流量および吹付け作業に必要な空気ボリュームの供給可能時間の測定を行った。

試験の結果、以下の点が確認できた。

- ・必要な気体流量に適した圧力調整器を選定すれば、窒素ポンベによる吹付けが可能
- ・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
- ・材料吐出量を $0.5\text{m}^3/\text{h}$ とした場合、窒素ポンベ 1 本あたり 1 分間の吹付けが可能
- ・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. 3 ノズル回転装置の機構と動作確認

本装置では、吹付仕上がり精度に対応するため



写真-1 集合装置

写真-2 圧力調整器

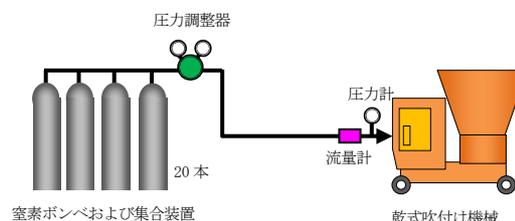


図-3 窒素ポンベによる吹付け時の概略構成

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。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回転させる構造とした。

ノズル回転装置の概略図を図-4 に示す。

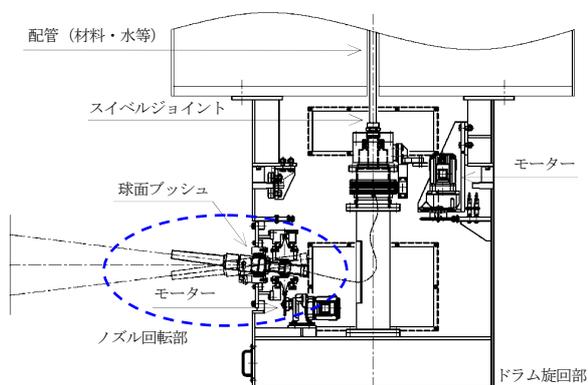


図-4 ノズル回転装置

3. 4 高温環境下における断熱構造の確認

本装置では吹付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°C とし、煙突内部吹付時間内はそれ以下に保つことを目標とした。本装置の断熱構造は、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円筒状に配置する構造とした。内部温度を均一に保つための構造検討に、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を実施した。

要素試験では、 200°C を保持した加熱炉の中に耐熱容器を設置し、断熱構造で装置内部温度を 60°C 以下に保つことができることを確認した。断

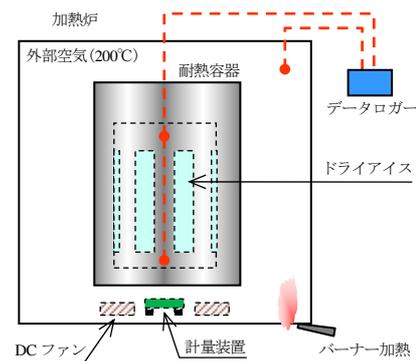


図-5 断熱構造試験の概略

熱構造試験の概略を図-5 に示す。

試験の結果、以下の知見が得られた。

- ・ドライアイス (12kg) 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
- ・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
- ・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

3. 5 煙突内における吹付装置の姿勢と変位

稼働中の煙突では、燃焼による上昇気流（ドラフト）が発生する。上昇気流による装置への影響を解析と実験により把握した。また、本装置に姿勢制御装置を設ける必要性を検討した。

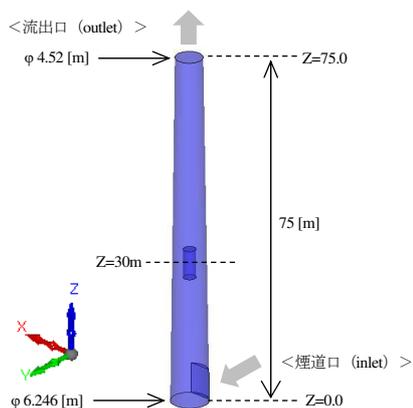


図-6 解析モデル

煙突全体のモデルと装置周辺の詳細解析モデルの2種類のモデルを用いて、上昇気流による装置の変位および周辺の流速を求めた。解析には熱流体シミュレーションソフト SCRYU/Tetra を用いた。実煙突を適用対象とした全体解析モデルを図-6 に示す。排ガス温度 200°C、装置重量 2 t、煙突流出口における風速 11.9m/s の条件で解析を行った。

解析結果の流速の大きさを図-7 に、装置重心位置の軌跡を図-8 に示す。装置の挙動は、装置側面が煙突内面から 1m 離れた位置にあるとき、軌跡は最大 30cm の変位（両振幅）となった。

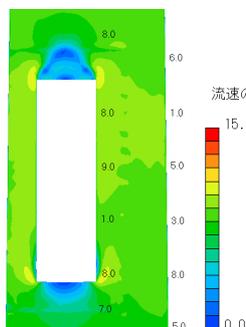


図-7 流速の大きさ (X-Y 断面)

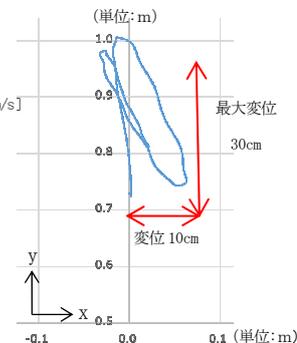


図-8 装置重心位置の軌跡

風洞実験では、1/10 スケールの模型を用いた実験を行った。風洞実験装置概略を図-9 に示す。吹付装置模型を写真-3 に、実験状況を写真-4 に示す。実煙突の排ガス温度 30°C、装置重量 2.2t、実風速 5~20m/s の範囲で実験を行い、風速と装置模型の変位を計測した。



写真-3 吹付け装置模型



写真-4 実験状況

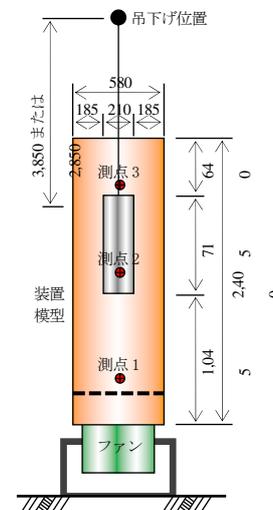


図-9 風洞実験装置概略

風洞実験の結果、実煙突換算で、風洞中央部風速 8~14m/s の範囲では、実装置で 1~30cm の最大変位（両振幅）に収まって安定した状態を維持するが、風洞中央部の風速が 16.7m/s を超えると壁に吹き寄せられるような大きな変位が観測された。実煙突の風速は排ガス温度 200°C でドラフトの風速 11.9m/s、排ガス温度 30°C の条件で換算値は風速 7.6m/s になり、壁に衝突するような大きな変位を示す風速は、実煙突のドラフトの風速 7.6 m/s の倍以上の 16.7m/s であることが確認できた。

熱流体解析および風洞実験の結果から、上昇気流による吹付装置の変位により、煙突に損傷を与える可能性は非常に低いことが確認でき、姿勢制御装置の必要性はないと判断した。また、吹付時の反力による装置の振れ幅は 2cm（両振幅）以下であり小さい。また、作業時の風によるクレーンブームの揺れは、装置の振れと共振することはないが、外気の風速により変動し、装置の位置制御に影響を与える。

4. 高温度域における吹付け材の品質確認

本装置の吹付補修では、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。そのため、常温硬化型のキャストブルを 200℃環境で吹付けを行い、材料試験により常温硬化時との力学特性を比較した。

4.1 品質確認試験項目

吹付材料メーカーで実施されている品質管理項目を参考にして選定した。試験は（財）岡山セラミックス技術振興財団に委託し、JIS 規定に準じて実施した。試験項目を表-1 に示す。

表-1 試験項目、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

4.2 試験方法

200℃環境下で吹付けを行うため製作した加熱炉を図-11 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-6 に示す。

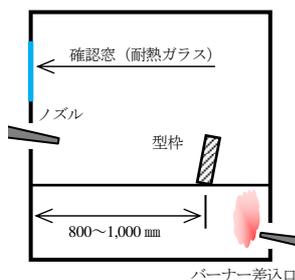


図-11 加熱炉概略図



写真-6 吹付け状況

吹付時の添加水量は、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。乾式吹付機の機械設定を表-2 に、添加水量を表-3 に示す。

表-2 乾式吹付け機械 機械設定

項目	単位	設定
回転数	r.p.m	6.0
材料ライン圧力	MPa	0.05
水圧	MPa	0.7
エア圧力	MPa	0.6

表-3 添加水量

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

4.3 試験結果

品質確認試験結果を表-4 に示す。表中の代表値は常温で硬化させたものの値である。

表-4 品質確認試験結果（200℃環境下）

試験項目	単位	材料A		材料B		材料C		材料D		材料E	
		代表値	測定値	代表値	測定値	代表値	測定値	代表値	測定値	代表値	測定値
かさ比重	-	2.02	2.04	1.85~2.0	1.89	1.83	1.93	-	2.06	-	2.04
曲げ強さ	N/mm ²	3.90	6.90	7.85	8.10	1.30	0.60	-	9.80	7.00	12.00
圧縮強さ	N/mm ²	20.10	28.40	-	56.40	4.20	5.90	-	57.70	45.00	48.80
熱伝導率	W/(m・K)	0.71	1.18	0.64	1.20	-	測定不可	-	0.90	0.84	1.18

※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

200℃環境で吹付けた試験体の値は、材料 A、B、E では代表値よりも大きな値が得られている。一般的な吹付材料であり、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。材料 C では圧縮強さは代表値よりも大きいものの、曲げ強さは代表値の半分程度の値となった。曲げ強さの低下原因は、圧縮強度が他の材料より 1/10 と小さいことによる熱影響が考えられた。かさ比重については、どの材料も代表値とほぼ同じ値が得られた。

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。

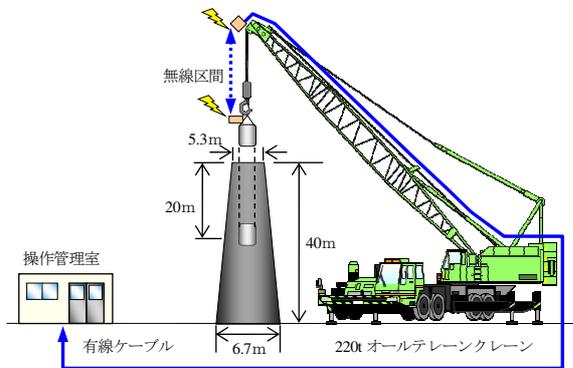
5. 実煙突での実証試験

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試験を行った。運転休止のため、常温環境下での実験であるが、以下の項目について確認を行った。

- 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

5.1 実証試験概要

実証試験では、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 220 t 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 25 t ラフタークレーンを使用した。実証試験の概要を図-12 に示す。



※操作管理室にカメラモニター・高さ表示器・監視モニター・操作盤を設置

図-12 実証試験概要図

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

表-5 装置仕様

吹付け機械	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 (max1.1m³/h)
	所要空気圧力	0.6MPa
圧縮ガス供給量・吐出量		7m³×20本 (2m³/min)
添加水水槽・ポンプ		タンク90L、ポンプ3L/min (MAX)
材料ホッパー容量		0.262m³ (14袋)
耐熱容器	外径、寸法	φ2,100、H:2.2m×2基、H:1.47m×1基
	自重	8.91 t
	耐熱構造	ドライアイス、ファインブラケット、マイクロサーム

5.2 実証試験結果

i) 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。吹付け作業のサイクルは計画時のものを上まわり 1.38 時間であった。

ii) 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

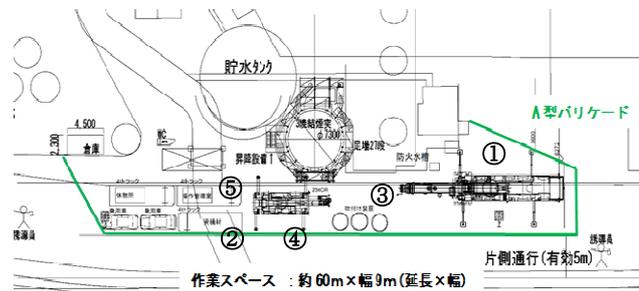
の高さによるクレーン仕様の選定により変化するが、本実証試験では 30.6 時間を要した。施工箇所位置図および資機材配置状況を図-13 に示す。

表-6 吹付け作業サイクル

	作業内容	計画(分)	実績(分)
①	窒素瓶カードル入れ替え	30	10
②	耐火材料投入	20	21
③	吹付け装置投入	30	20
④	吹付け時間	30	27
⑤	吹付け装置取出し	30	5
吹付けサイクル合計		140 (2.33 時間)	83 (1.38 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
220tCR 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
220tCR 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)



- 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 3.1 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-13 施工箇所・資機材配置状況

iii) 無線遠隔操作における操作性

実証試験においては、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および映像信号の不具合もなく、操作・撮影および録画ができた。

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。無線操作および監視状況を写真-7 に示す。



⑤：ハウスカー（吹付操作室）
写真-7 無線操作および監視状況

モニターによる吹付作業は、煙突上部と下部が開放による空気の流動の効果もあったが、吹付材料のリバウンドが煙突内部に滞留することはなかった。また、カメラへの吹付材料のリバウンドの付着もなく、カメラ映像の視認性は良好であった。

iv) ノズル回転装置による吹付けの仕上がり状態
吹付け時にはクレーンブームの揺れによって、吹付装置に最大 50cm（両振幅）の揺れが生じたため、一定の吹付距離を保てない状況があった。また、モニター映像による吹付厚の確認も、目視と異なり十分な立体感を掴むことの不慣れもあった。しかし、仕上がり状態は目標 50mm に対して、均一な厚さにするための不陸の修正は難しかったが、ノズル回転装置により 50~100mm の吹付厚さを確保して施工することができた。吹付試験結果を表-8 に示す。吹付試験結果（2 日目）を写真-8 に示す。

表-8 吹付試験結果

日時	規定高さ	吹付作業時間	天候、気温	風速	装置の揺れ	吹付面積 (m ²)
1日目	20m	14:10~14:38	晴れ6.0℃	0~5m	20~30cm	3.76
2日目	0m	10:44~11:11	晴れ4.8℃	5~10m	50cm	2.26

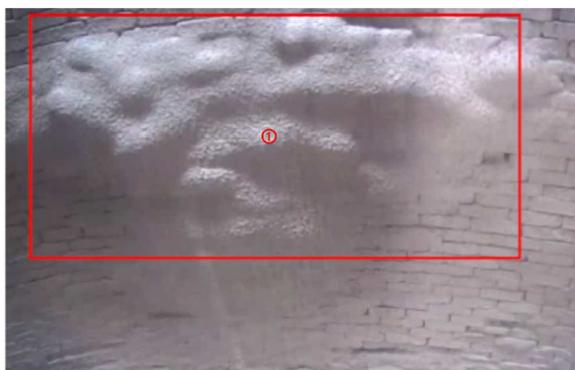


写真-8 吹付試験結果
①：幅 1.9m×高さ 1.1m

6. まとめ

本開発の目的である「煙突内部調査時に併せて、無線操作による遠隔操作での吹付補修を実施する装置」を開発することができた。吹付装置の無線操作による吹付の仕上がり状態の向上に課題は残されているが、モニターによる吹付作業の習熟により、改善されると考えられる。

7. あとがき

既設煙突は、今後も増大が見込まれる社会資本の老朽化と同様に維持・更新の到来を迎えている。ただし、煙突を補修するには、操業を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。

本装置の適用は、煙突を使用したまま補修することで、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。

煙突補修装置の全体構成は開発することができたが、外気風速によるクレーン本体の揺れに影響を受けることなどもわかり、荷ぶれ制御や、モニター技術の改善による吹付出来形の向上など、今後の課題も残されている。

本研究の遂行にあたり、日本製鉄㈱の辻本恭平氏には多大の協力を賜った。この場を借りて心より謝意を表します。