

カーボンニュートラルに貢献する乾燥不要な吹き付け材の開発

古賀正徳, 徳富篤史, 神尾英俊*, 松永隆志

黒崎播磨(株) 不定形製造事業部 〒806-8586 福岡県北九州市八幡西区東浜町 1-1

Development of Gunning Material that without a Drying Process that Contribute to Carbon Neutrality

Masanori KOGA, Atsushi TOKUTOMI, Hidetoshi KAMIO and Takashi MATSUNAGA

Krosaki Harima Corporation, Monolithic Division, 1-1, Higashihama-machi, Yahatanishi-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka, 806-8586, Japan

1 緒言

一般ごみ・産業廃棄物・バイオマス発電ボイラーなどの環境炉, またはアルミ溶解炉・セメントプラントなどの非鉄処理炉において, 補修用途を主に乾式吹き付け工法が広く適用される。一般的な乾式吹き付けでは, セメント含有材料を高圧のエアで搬送し, ノズル部で水と混合しながら吹き付ける。施工体はセメントの水和物生成によって緻密になるが, この水分除去に長時間の乾燥を要するため, 補修工期が長くなる一因となっている。また, この乾燥では重油などの化石燃料をバーナーで燃焼して昇温するため, 多量のCO₂が排出される。

一例として, A社のストーカ式焼却炉における定期補修工事では, 50 hの乾燥を実施する。この時の燃料使用量はA重油で8.3 kℓであり, 二酸化炭素排出係数 (A重油: 2.71 t-CO₂・kℓ⁻¹)¹⁾ より換算すると, 約22 tものCO₂排出量に相当する。

乾燥工程がなくなった場合, CO₂排出削減が可能となり, SDGsの目標のひとつ「13. 気候変動に具体的な対策を」に貢献できると考えられる。今回, 施工後の常温養生のみで操業を開始できる乾燥不要な吹き付け材を開発し, 実炉

での適用実績が得られたため報告する。

2 乾燥不要な吹き付け材の開発

2.1 システム概要とその効果

これまで乾燥工程を必要としていた理由は, 吹き付け施工中に使用する水分を除去するためである。爆裂による材料剥落を防止するために, 内部蒸気圧が高くないように, 長時間乾燥を実施している。乾燥不要な材料とするためには, 急加熱しても爆裂しないことが重要であり, そのためには高い通気性を有していることが必要である。通気性を高めるために, セメントを使用しない材料系を考えた。一方でセメントを使用しない場合, 強度の低下による爆裂が懸念されるため, 強度低下は極力抑える必要がある。

一般的な乾式吹き付け工法では, 図1に示すとおり粉体と水をノズル部で混合する。この手法では, 粉体中に配合した結合剤を水に溶解させた後に材料の凝集を瞬時に発現させる必要があるため, 過剰な水分が必要になる場合が多い。さらには結合剤の溶解不足によって分散性が低下し, 施工体の組織も不均質になりやすい。

これらの課題に対し, 今回の検討材料では水の代わりに珪酸系溶液を用いることで, 強度の向上を図った。なお,

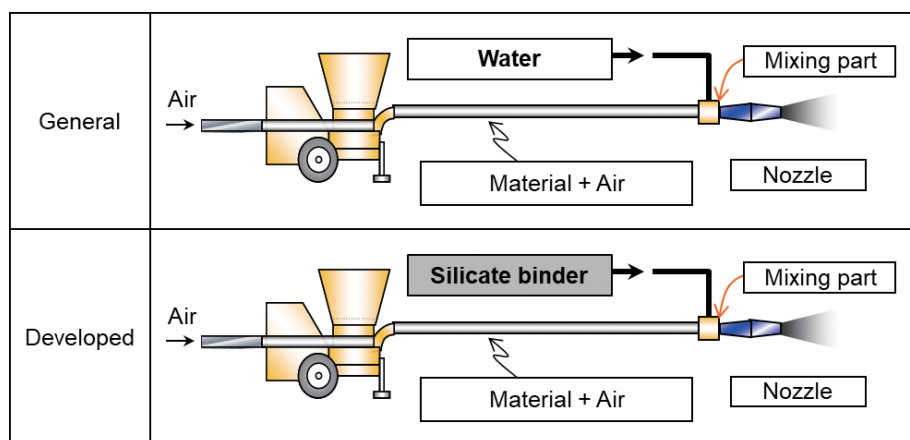


Fig. 1 Comparison of general gunning system and developed gunning system.

* 黒崎播磨(株) 技術研究所

Table 1 Material properties of non-cement materials Al_2O_3 90 % and include cement material

Material	a	b	c	d
Type of binder	Cement	Powder silicate	Liquid silicate	
Chemical composition / mass%				
Al_2O_3	70	73	72	91
SiO_2	23	17	19	6
CaO	4			
Permanent linear change / %				
After firing 1400 °C×3 h	-1.2	-2.7	-0.7	-0.4
Cold crushing strength / MPa				
After drying 110 °C×24 h	31	4	18	15
After firing 1400 °C×3 h	49	81	89	84

この系は従来水を通していたラインに珪酸系溶液を適用するのみであることから、一般的な乾式吹き付け装置での施工が可能である。

2・2 材料品質特性

当社における代表的なセメント系吹き付け材、及び今回開発した珪酸系バインダーを粉体、または溶液とした材料の品質を表1に示す。品質測定サンプルは、所定の流量で混練した材料を160×40×40 mmのサイズに鋳込み採取した。

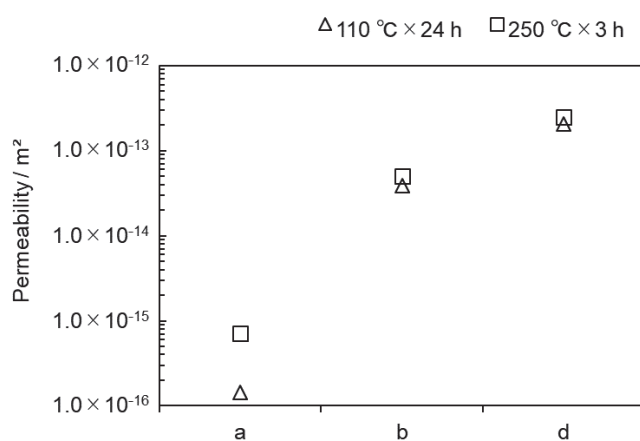
結合剤を粉体（材料b）から溶液（材料c）に変更したことで、110 °C×24 h乾燥後の強度を向上できたことがわかる。

また、圧縮強度が同程度で環境炉の高温処理炉適用を考慮した焼結アルミナ主体の骨材構成とした材料dを選定し、材料a、bと比較検討した。

3 乾燥性

3・1 通気性

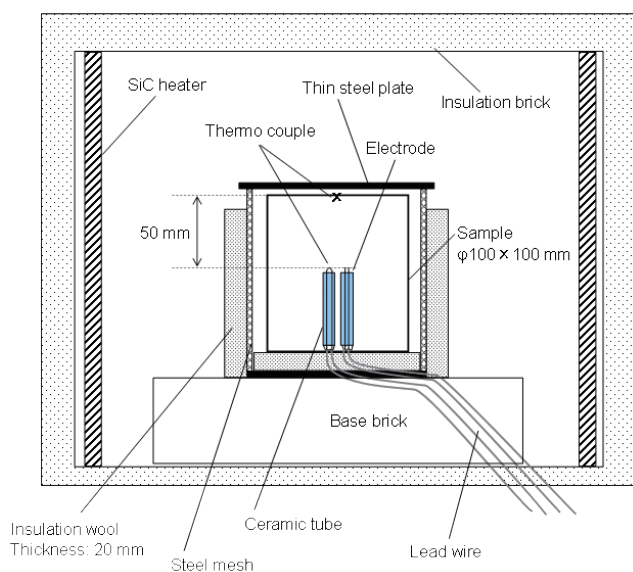
爆裂を防止する方法としては材料の通気性を大きくし

**Fig. 2** Permeability of various materials.

て、材料内部に発生する水蒸気圧を小さくすることが有効である。図2に材料a、b、dの110 °C×24 h加熱後、250 °C×3 h加熱後の通気率を示す。材料b、dはセメント系吹き付け材aよりも、通気率が大幅に高いことがわかる。これはセメントを含まないためにカルシウムアルミネート水和物を生成しないことが原因と推定される。

3・2 急加熱時の内部蒸気圧

材料dについて急加熱時に発生する内部蒸気圧を推定するために、熱電対と電極を埋め込んだ試料を用いた投げ込み法での乾燥試験を実施した。試料及び周辺部材の概略図を図3に示す。試料は万一の爆裂に備えて円筒型の金枠内に配置し、また、できるだけ上面からの片面加熱となるように底面と側面に断熱ウールを取り付けた。電極及び熱電

**Fig. 3** Schematic figure of the testing setup for obtain estimated value of internal vapor pressure during drying.

対は絶縁性と密閉性を考慮してセラミックスチューブに通した上で隙間を耐熱シール材で充填した。内部に埋め込んだ電極は材料内部の電気抵抗値の測定に用いられ、電気抵抗値から材料内部の含水状態を知ることができる。含水が十分にある場合、内部蒸気圧は飽和蒸気圧曲線とおおむね一致する²⁾ので、電気抵抗値と熱電対により得られた温度とを合わせて用いることで、内部蒸気圧の推定が可能である³⁾。

評価には表1に示す材料dを用い、電気炉の温度条件は650℃とした。

図4に試験結果の一例を示す。材料の内部温度は加熱開始から約800 sで100℃程度となり、約1000 sまでその温度

を維持している。この間の電気抵抗値は低く、まだ含水した状態であることを示している。その後約1350 sから電気抵抗値が増加しており、電極を埋め込んだ試料中央部の含水量が低下したことが推察される。内部蒸気圧の推定値を図4に併せて示しているが、その値は、最大で0.04 MPa程度と本材料の強度と比較して非常に小さく、爆裂を引き起こすほどの内部蒸気圧は発生しないことがわかった。なお、試料は試験後に切断して断面を観察したが、亀裂は確認できなかった。

3・3 急加熱の大型試験

材料dは、急加熱時の内部蒸気圧が非常に小さく、耐爆裂性に優れることがわかった。次に大型乾燥実験炉を用い

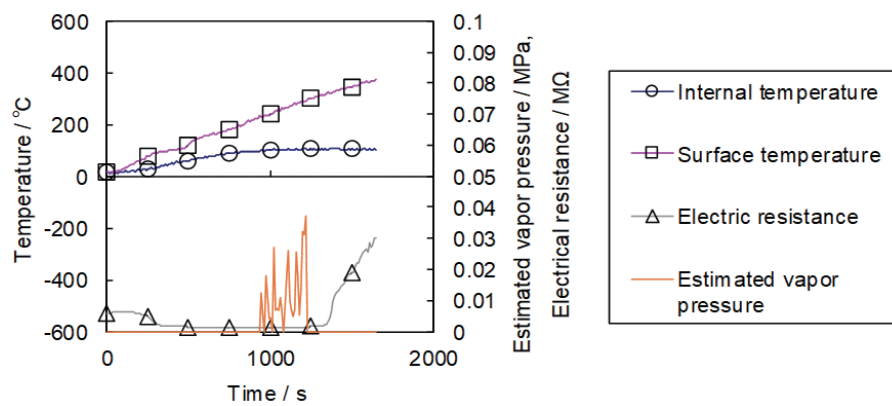


Fig. 4 Estimated internal vapor pressure by measured result of electric resistance.

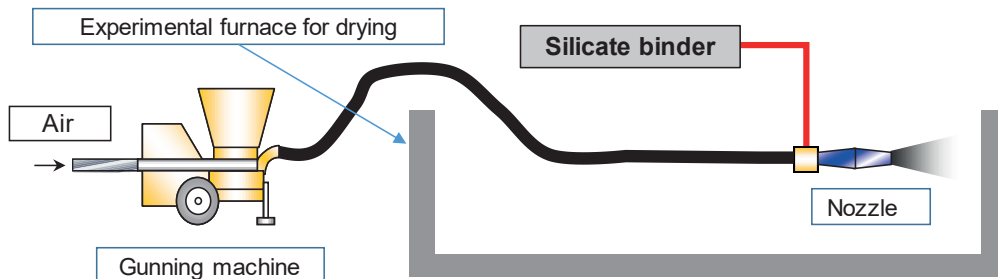


Fig. 5 Schematic figure of experimental furnace for gunning.

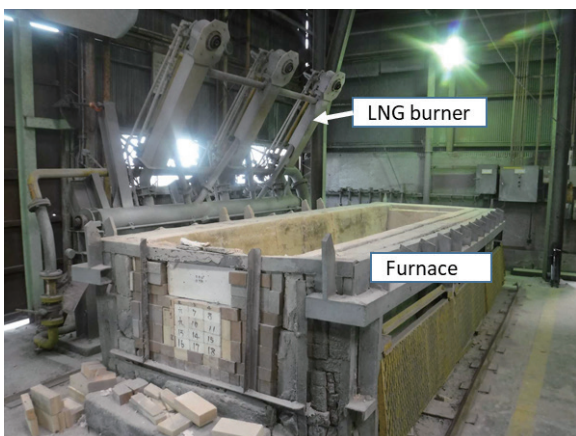


Fig. 6 Photo of experimental furnace for drying.

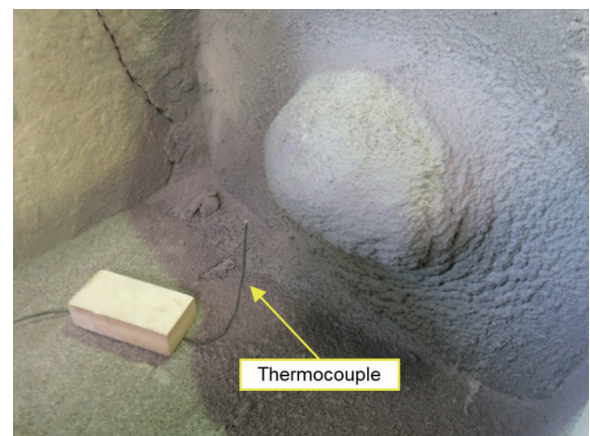


Fig. 7 Result of quick heating experimental.

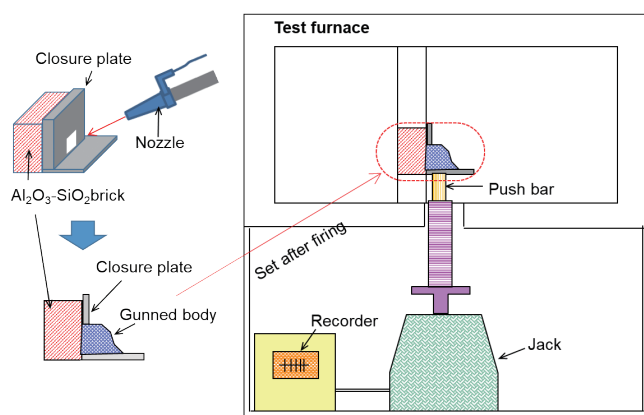


Fig. 8 Schematic of adhesive shear strength measurement method.

て、吹き付けから急加熱までの実炉を想定した試験を実施した(図5, 6)。施工厚みは200 mm以上とし、常温で24 h養生した後に、1 hで800 °Cまで急加熱した。図7に急加熱後の吹き付け施工体の状態を示す。乾燥後に亀裂や剥離は見られず、健全な状態を維持していた。

4 母体との接着性

吹き付け補修において、母体との接着性は耐用に大きな影響を与える重要な特性である。接着性を評価するため、図8に示す装置⁴⁾を用い、アルミナれんがと吹き付け施工体との常温でのせん断接着強さを測定した。手順は以下のとおりである。

- ① Al_2O_3 組成60 %のれんがに一樣な切り欠きを設けた枠プレートを取り付けて、切り欠き枠内に吹き付け

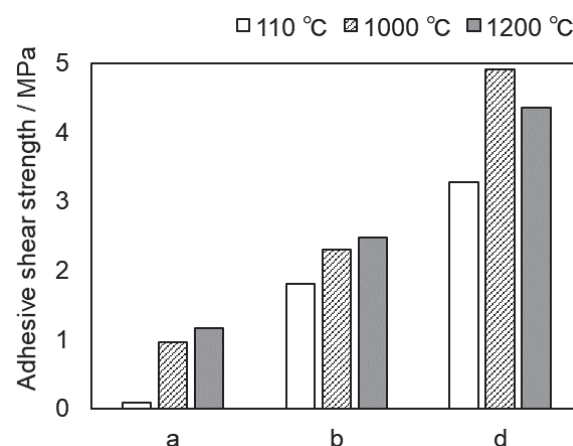


Fig. 9 Adhesive shear strength of various materials.

- ② 吹き付けた施工体をれんが、切り欠き枠と共に加熱処理を実施(加熱処理温度は110 °C, 800 °C, 1000 °C, 1200 °Cとして、それぞれ3 hとした)

- ③ せん断接着強さ測定装置上に加熱処理した施工体をセットし、破断強度を測定。

せん断接着強さの結果を図9に示す。セメント系の材料aはせん断接着強さが低く、試験破断面はれんがと吹き付け施工体の界面であったのに対し、珪酸系溶液を使用した材料dは低温から高温に至るまで接着強さが高く、破断した箇所は吹き付け施工体の内部であった。従って材料dの接着強さは施工体強度よりも高く、得られた測定結果よりも高いと言える。

また、材料dの高接着性のメカニズムを検証するため試験サンプルの一つである800 °C加熱処理について試験後の

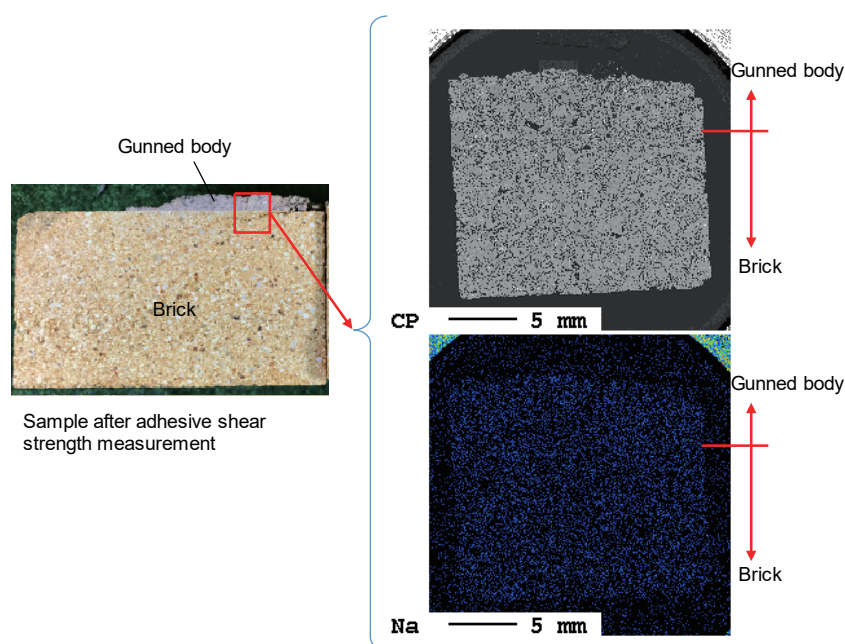


Fig. 10 Sample internal inspection result by EPMA.



Fig. 11 Photo of actual furnace construction.



Fig. 12 Photo of gunned body after 6 months.

れんがと吹き付け施工体の界面の観察を行った。図10にEPMAの結果を示す。吹き付け施工材とれんがとの接着界面から約5 mm以上のれんが内部の位置までバインダー成分であるNaが全面的に分散していることが確認できた。れんがにはNa組成が含まれないことから、このNaはバインダー成分がれんが内部へ浸潤していることになり、珪酸水溶液のアンカー作用効果で吹き付け施工体とれんがが一体となった強固な接着性を有するに至ったと考えられる。従来セメント系では得られなかった高接着性が確保できたことで、環境炉などの耐火材ライニングの保護効果が向上し、炉の延命へ大きく貢献できるものと考えられる。

5 実炉結果

開発した材料dを、A社における産業廃棄物ストーカ式焼却炉に適用した。施工部位は、燃焼帯傾斜天井部であり、母体のブロックを保護するため、30~40 mmの施工厚みであった。施工状況を図11に示す。リバウンドロスが5 %程度であり、従来のセメント系吹き付け材と同等以上の接着性であった。吹き付け施工体は常温で2日間養生され、炉を立ち上げる際の急昇温のみ実施後、作業を開始したものの、爆裂は確認されなかった。

また、炉の稼働から6か月経過後の耐用状況を図12に示す。一部、付着したスラグを剥がしているが、内部は白色でスラグの浸透がほとんどない状態であった。また、従来のセメント系材料では6か月後にほとんどが剥離する状態であったが、開発材の剥離損傷はほとんど見られず、優れた接着性による母体の保護効果が確認できた。

6 まとめ

環境炉及び非鉄処理炉の補修及びライニングとして使用される乾式吹き付け工法において、セメント非使用での溶液バインダー吹き付け工法によって乾燥不要の施工法が確立した。

A社産業廃棄物ストーカ式処理炉に本開発品を適用した

結果、乾燥を必要としなかったために、50 hの乾燥工程を省くことができ、約22 tのCO₂発生量を抑制することができた。今後のカーボンニュートラル（CO₂排出量ゼロ）に大いに貢献できるものである。また、これによって、燃料費用を大幅に低減できた。さらには、炉の立ち上げが50 h短縮できたために、ごみピット内に直積みされているごみ発生量低減にもつながった。このことは燃焼対象の油含有ごみの重量圧力による火災防止にも貢献し、環境防災面でも改善がなされた。今後、本開発品が客先及び国内において、使用増大により客先へのメリットもさることながら、SDGs及びCO₂排出量ゼロの環境への貢献度が上がることを期待する。

文献

- 1) 経済産業省・環境省：特定排出者の事業活動に伴う温室効果ガスの排出量の算定に関する省令，(2021-7-9)。
- 2) 神田美津夫，上野治幸，木脇祐和，江口忠孝：耐火物，40 [5] 270-364 (1988)。
- 3) 神尾英俊，萩原世也：第1回鉄鋼用耐火物専門委員会報告集，耐火物技術協会 (2013) pp.117-126。
- 4) 本田和寛，松永隆志：耐火物，67 [11] 546-552 (2015)。

略歴



古賀正徳

1985年 国立佐世保工業高等学校
工業化学科 卒業
同年 黒崎窯業(株) (現 黒崎播磨(株))
入社
不定形耐火物の開発に従事
2003年 海外事業部海外技術Gr
2015年 ファーネス事業部君津事業所
製鋼整備Gr
2019年 不定形製造事業部不定形技術部
マネージャー
現在に至る



神尾英俊

1996年 兵庫県立姫路工業大学
(現 兵庫県立大学)
理学部物質科学科 卒業
同年 ハリマセラミック(株)
(現 黒崎播磨(株)) 入社
不定形耐火物の開発に従事
2000年 数値解析及び評価技術開発に従
事
2010年 佐賀大学大学院工学系研究科
博士後期課程 修了
現職 黒崎播磨(株) 技術研究所 共通基
盤研究センター マネージャー



徳富篤史

2018年 黒崎播磨(株) 入社
不定形耐火物の開発に従事
2021年 不定形技術部製鋼不定形・補修
材グループ
アシスタントマネージャー
現在に至る



松永隆志

1988年 黒崎窯業(株) (現 黒崎播磨(株))
入社
不定形耐火物の開発, 製造に
従事
2021年 不定形製造事業部長