

SDGs, カーボンニュートラルに貢献可能な乾燥不要な吹き付け材の開発

古賀正徳, 徳富篤史, 松永隆志, 西 敬, 井手浩二

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番1号

Development of Gunning Material that can Contribute to SDGs and Carbon Neutrality without Drying Process and Results of Application to an Actual Furnace.

Masanori KOGA, Atsushi TOKUTOMI, Takashi MATSUNAGA, Takashi NISHI and Koji IDE

KROSAKI HARIMA CORPORATION 1-1, Higashihamamachi, Yahatanishi-ku, Kitakyushu City, Fukuoka, 806-8586, Japan

要 旨: 耐火物でのSDGs (目標13: 気候変動に具体的対策を), カーボンニュートラルに貢献をするための最優先課題としては, 耐火物施工体の乾燥工程を省略することである。今回セメントを全く含有しない施工材料および施工法の検討を重ねた結果, 乾燥工程を必要としない施工材料および施工方法の開発に至った。ここにその開発内容及び実機結果を記載する。

キーワード: 乾燥不要

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や非鉄処理炉において, ライニング材および補修材として主に乾式吹き付け工法が広く適用されている。一般的な乾式吹き付け材は, 結合剤としてアルミナセメントを含有しており, セメントの水和物生成によって強度が発現し, 施工体を形成する。施工時に吹き付け材の粉体は高压のエアで搬送され, ノズル部で水と混合し, 吹き付けされる。形成された施工体には水分及びセメントの水和物があるため, 使用に供する前にこれらの乾燥・脱水が必要となる。

緻密な施工体から水分を除去する乾燥には長時間を要するため, 補修工期が長くなる一因となっている。また, 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。

今回, 乾燥工程の省略, 及びCO₂排出量の削減が可能となり, 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 A社における産廃ストーカ式焼却炉の概要と作業温度

A社産業廃棄物ストーカ式焼却炉の概要と部位ごとのおおよその作業温度を図1に示す。高温にさらされることにより, ライニング耐火物としては, アルミナ含有量が高く, 強度が高い施工体となるアルミナセメント含有流し込み材料が使用されてきた。その問題点としては, 緻密な施工体であるため, 乾燥時間が長く, 時として爆裂現象が生じて

いた。また, 補修方法として, 乾式吹き付け方法による補修が実施されていたが, セメント含有材料であるために, この材料においても長時間の乾燥時間が必要であった。

2・2 従来耐火物の乾燥工程によるCO₂排出量

A社産業廃棄物ストーカ式焼却炉における定期補修工事

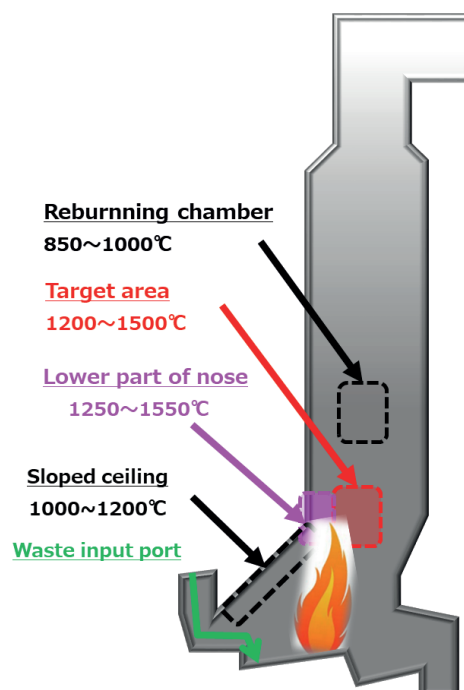


Fig. 1 Overview of Company A's industrial stoker-type waste incinerator.

での乾燥パターンを図2に示す。乾燥パターンは、炉の耐火物ライニング厚みとライニングされた材料の緻密性より昇温のスケジュールを設定するが、これまで90 hの乾燥が余儀なくされていた。この時の燃料使用量はA重油で40.5 klであり、二酸化炭素排出係数（A重油： $2.71\text{t}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{kl}^{-1}$ ）¹⁾より換算すると、約110 tものCO₂排出量に相当する。

2・3 乾燥不要な吹付け材のシステム概要とその効果

今回、施工後に乾燥をせずに炉の立ち上げを可能とすることを目標とした。これまで乾燥工程を必要としていた理由は、吹き付け施工中に添加した水分を除去するためであり、乾燥工程途中での爆裂を回避するために昇温をゆるやかに長時間をかけて行う必要があった。従来、爆裂の防止を目的に、乾燥工程で耐火物内部の蒸気圧が高くないように温度をコントロールしながら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。そこで、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が、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った。

一般的な乾式吹き付け工法では、図3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

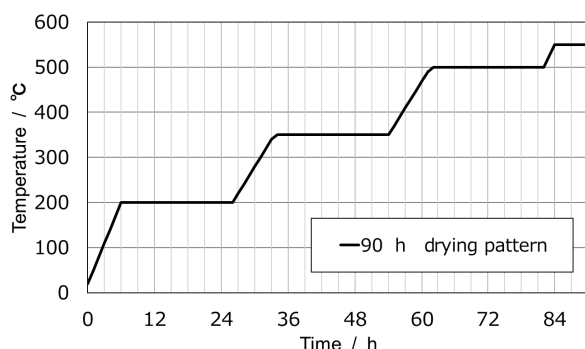


Fig. 2 Refractory drying pattern at Company A.

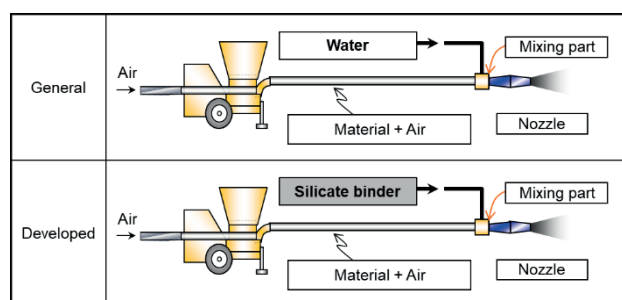


Fig. 3 Comparison of general gunning system and developed gunning system.

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、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・4 材料品質特性

表1にA社で使用されてきた従来のセメント系吹き付け材（材料a）、今回開発した液状珪酸系バインダーを使用した材料（材料b）、および比較材料として、粉末珪酸系バインダーを使用した材料（材料c）の品質を示す。これらの品質は、所定の液量で混練した材料を160×40×40 mmのサイズに成形したサンプルにて測定した。

結合剤を粉体（材料c）から溶液（材料b）に変更したことで、110 °C×24 h乾燥後の強度および1400 °C×3 h焼成後の強度が向上している。

また、液状珪酸バインダーを使用したことで、トータルの添加液量を減量できたことから焼成後収縮率も減少に至っている。

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4に材料a、bの110 °C×24 h加熱後、250 °C×3 h加熱後の通気率を示す。開発材料b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

Table 1 Properties of materials containing 70% of Al₂O₃

a: conventional (alumina cement binder), b: developed (liquid silicic binder), c: conventional (powder silicic binder).

Material Number	a	b	c
Type of Binder	Cement	Liquid Silicate	Powder Silicate
Chemical composition / mass%			
Al ₂ O ₃	70	71	72
SiO ₂	23	20	19
CaO	4		
Permanent linear change / %			
After firing 1400 °C×3 h	-1.2	-0.2	-2.7
Bulk density / g·cm ⁻³			
After drying 110 °C×24 h	2.29	2.30	2.18
After firing 1400 °C×3 h	2.30	2.29	2.38
Modulus of rupture / MPa			
After drying 110 °C×24 h	8	5	3
After firing 1400 °C×3 h	11	16	13
Cold crushing strength / MPa			
After drying 110 °C×24 h	31	18	4
After firing 1400 °C×3 h	49	73	81

物を生成しないことによる効果と推定される。

3・2 急加熱時の内部蒸気圧の推定

材料b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、急加熱による乾燥試験を実施した。試料および周辺部材の概略図を図5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。電極および熱電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bを用い、電気炉の温度条件は650℃とした。

図6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800sで100℃程度となり、約1000s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1350s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

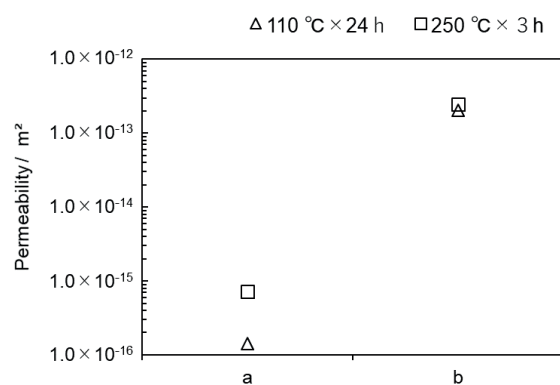


Fig. 4 Permeability of material a and b.

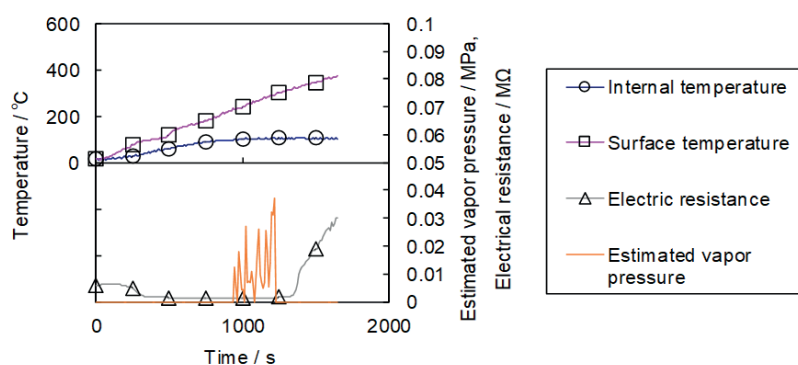


Fig. 6 Estimated internal vapor pressure by measured result of electric resistance.

図6に併せて示しており、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、内部亀裂などは確認できなかった。

3・3 実際の吹き付け施工体の急加熱試験

材料b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7, 8)。施工厚みは200mm以上とし、常温で24h養生した後に、1hで800℃まで急加熱した。図9に急加熱後の吹き付け施工体の状態を示す。実機を想定した急加熱でも爆裂現象は生じず、施工体に亀裂や剥離も見られず、健全な状態であることが確認できた。

4 アルカリ浸透抑制

ストーク式焼却炉における耐火物の損傷は、ノーズ上部・

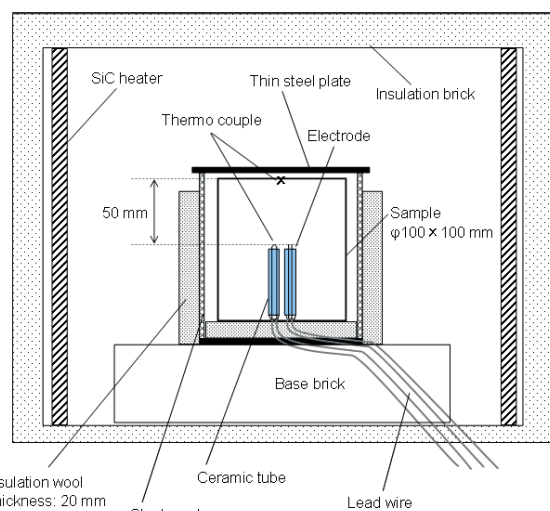


Fig. 5 Schematic figure of the testing setup to obtain estimated value of internal vapor pressure during drying. Sample size: 100mm in diameter and 100mm in height.

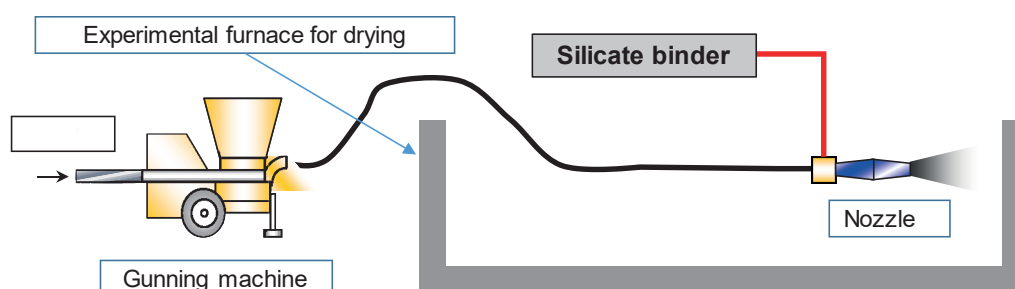


Fig. 7 Schematic figure of gunning system in an experimental furnace.



Fig. 8 Photo of experimental furnace for drying.

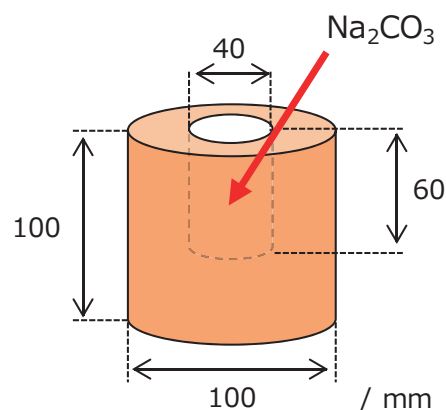


Fig. 10 Crucible shape alkaline penetration test method.

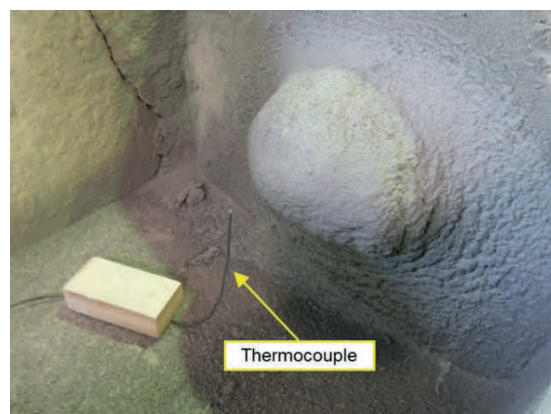


Fig. 9 Result of quick heating experimental.

ターゲット部においては、アルカリ浸透起因の構造スポールが主体と考えられる。これは、焼却物残渣であるクリンカー中のアルカリ源が高温操業により低粘性化し、施工体内へ浸透し組織の脆弱化を引き起こす現象である。

今回、表1の従来材料aと乾燥不要な材料bのアルカリ浸透試験を図10に示す試験内容で実施した。A社のスラグ分析結果よりアルカリ成分の中の特に Na_2O が大きな影響を及ぼしているものと推測し、炭酸ナトリウムを浸透剤として使用した。サンプルは直径100mm、高さ100mmの円筒形状に直径40mm、深さ60mmの穴を設けた形状とした。サンプルを1000℃で焼成した後、炭酸ナトリウム21gを投入し、1000℃で12時間焼成した。焼成後サンプルを

切断し、アルカリ浸透性を比較した。その結果を図11、12に示す。従来セメント系材料aは、アルカリ浸透が深く、外周に亀裂が発生、バースティングしている(図11)。一方、開発材料bは外周に亀裂はなく、アルカリ浸透が稼働面側で抑えられている(図12)。

5 母体との接着性

吹き付け材を補修用として用いた場合の損傷形態の一つとして、母材との接着性が弱く接着界面から剥離することが挙げられる。その接着性を評価するため、図13に示す装置⁴⁾を用い、アルミナれんがと吹き付け材施工体との常温でのせん断接着強さを測定した。手順は以下の通りである。

- ① Al_2O_3 組成60%のれんがに様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
- 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℃, 800℃, 1000℃, 1200℃として、それぞれ3h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14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bは低温から高温に至るまで接着強さがセメント系の

材料aに比較して、3倍以上せん断接着強さが高い。特に1000℃処理後のサンプルでは、破断面は吹き付け施工体の内部であった。従って材料b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。珪酸系粉末を使用した材料cは、珪酸系溶液を使用した材料bよりは、せん断接着強さは低い、セメント系の材料aよりは、2倍以上せん断接着強さは高いものであった。

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。

6 実炉結果

6・1 通常炉内補修への適用結果

開発した材料bをA社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、ターゲット部など広範囲に適用され、30～40 mmの施工厚みであった。施工状況を図15に示す。リバウンドロス率は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付着性であった。吹き付け施工体は常温で2日間養生され、水分除去のための緩やかな昇温をすることなく、炉を立ち上げる際の急昇温のみ実施後、操作を開始したものの、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16に示

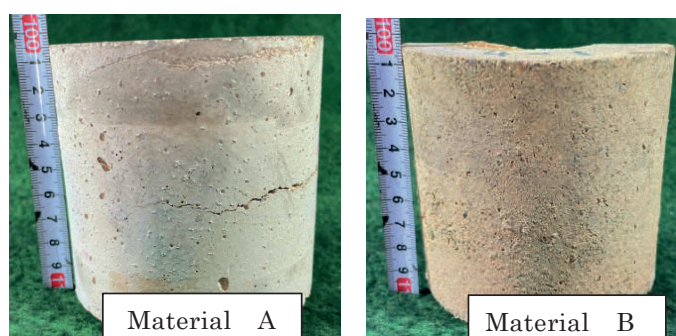


Fig. 11 Photo of sample surface after alkaline penetration test.

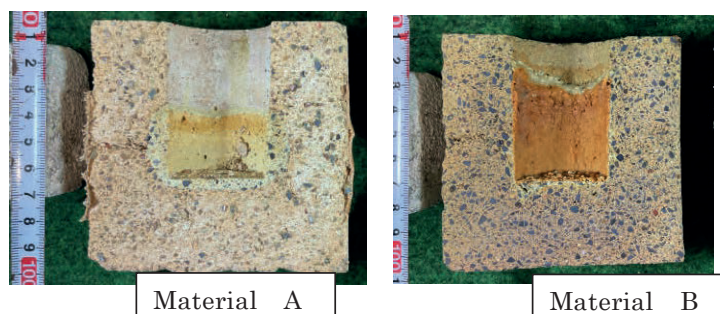


Fig. 12 Photo of sample cut surface after alkaline penetration test.

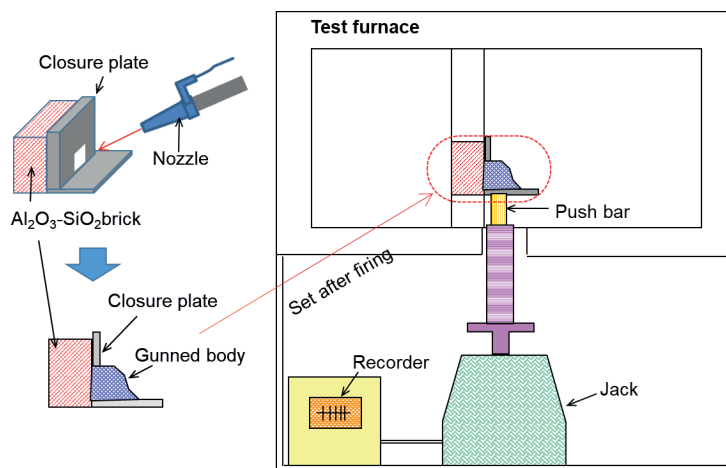


Fig. 13 Schematic of adhesive shear strength measurement method.

す。一部、付着したスラグを剥がしているが、内部は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、アルカリ浸透抑制および優れた接着性による母体の保護効果が確認できた。

6・2 緊急補修（炉外）への適用結果

A社産業廃棄物ストーカ式焼却炉では燃焼効率を高める作業へ変更されたことで、再燃焼室上部の鉄皮が赤熱する現象が発生した。

そこで材料bを用いて炉外より熱間300℃で緊急補修を実施した。その状況写真を図17～20に示す。炉内温度は約300℃であったが付着性良好であり、厚み100～150mmでネック部を施工し、その後急昇温で炉の立ち上げが実施され、24時間で緊急補修が完了した。補修を施した施工体においては、その後3か月炉内補修工事が実施されるまで耐用した。

このような鉄皮が赤熱し緊急を要する補修の場合、従来のセメント系の材料では熱間施工が不可能で、炉を常温まで冷却後、常温で吹き付け、かつ施工体の乾燥が必要となり、図21に示すように最低でも5日間の炉の停止が必要で

あった。しかし、今回開発品である材料bを用いることで、炉を常温まで冷却することなく炉外からの熱間施工が可能となり、1日で補修が終了、かつ施工体乾燥の時間を要することなく、すぐに作業が開始できた。これにより、作業停止日数が大幅に短縮でき、作業機会ロス低減へも大きく寄与できた。

7 まとめ

環境炉や非鉄処理炉のライニング材及び補修材として使用される乾式吹き付け工法において、アルミナセメントレスで溶液バインダーを用いた材料を開発し、乾燥不要で作業に供する技術が確立した。

A社産業廃棄物ストーカ式焼却炉に本開発品を適用した結果、乾燥を必要とせず、図22に示すように78 hの乾燥工

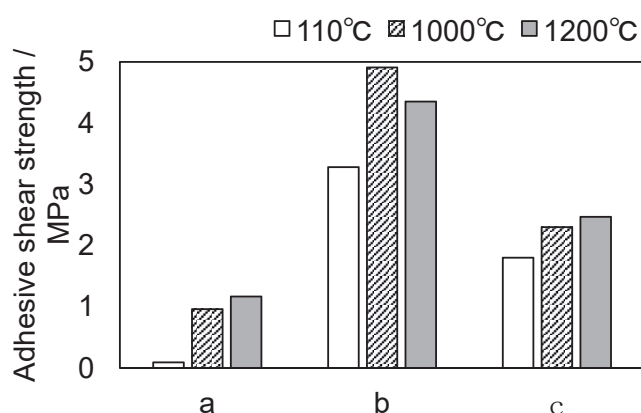


Fig. 14 Adhesive shear strength of various materials.



Fig. 15 Photo of actual furnace construction.



Fig. 16 Photo of gunned body after 6 months.



Fig. 17 Photo of steel shell red-hot part.



Fig. 18 Photo of area to be gunned.

程を省くことができ、約110 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78h短縮できたために、ごみピット内に焼却待ちで滞留するごみ発生量低減にもつながった。このことは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。さらに、緊急補修時に熱間での施工、早期の炉の立ち上げが可能であり、炉の停止時間を最小限に抑えることができた。今後、本開発品が国内外のお客様において使用され、お客様客先へのメリットもさることながら、SDGs および CO₂排出量ゼロの環境へ貢献することを期待する。

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)。
- 5) 古賀正徳，徳富篤史，神尾英俊，松永隆志：耐火物，73 [9] 426-431 (2021)。



Fig. 19 Photo of gunning process.



Fig. 20 Photo of repaired part.

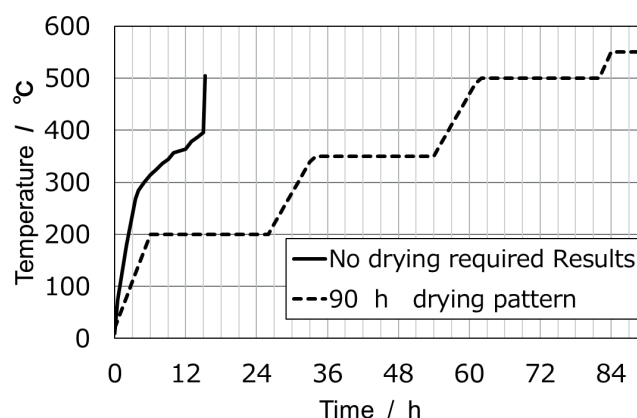


Fig. 22 Drying pattern of the furnace in Company A.

Days	1	2	3	4	5
Conventional emergency repair method(inside furnace)	Cooling	Cooling	Scaffolding	Gunning, Scaffolding removal	Drying (24hrs)
New repair method (outside the furnace)	Cooling, gunning, heating (Operation)				

Fig. 21 Comparison of number of days between conventional emergency repair pattern and new repair method.