

セメント製造プロセスの カーボンニュートラル化に 向けたガス焼成技術の検討

太平洋セメント株式会社 中央研究所セメント・コンクリート研究部プロセス技術チーム 下田 翔
 太平洋セメント株式会社 中央研究所セメント・コンクリート研究部プロセス技術チーム 北澤 健資
 太平洋セメント株式会社 中央研究所セメント・コンクリート研究部プロセス技術チームリーダー 寺崎 淳一

1. はじめに

当社は、2021年5月に23中期経営計画の中で公表した「カーボンニュートラル戦略2050」に基づき、カーボンニュートラルを実現するための様々な研究開発を進めている。

図-1は、カーボンニュートラル実現に向けた当社の技術開発ロードマップである。この中でガス焼成は、天然ガスやCO₂を原料とする合成メタン、さらにはアンモニアや水素といったカーボンフリー

ガス燃料を活用していくための技術として位置付けられる。

セメント製造におけるCO₂排出削減には、クリンカー焼成用エネルギーをよりCO₂排出量の少ないエネルギーへと転換することが必要である。当社では、CO₂排出削減と循環型社会形成への貢献という観点から、廃プラスチック等の廃棄物の処理拡大を積極的に進めている。これに加えて、CO₂排出量が少ない天然ガス(LNG)を活用することは、より一層のCO₂排出削減に寄与する。従い、天然ガスを混焼

し、かつクリンカーの品質を保持しながら安定的に製造するための焼成技術の確立が重要となる。

他方、当社ではセメント製造プロセスの一部である仮焼炉で排出されるCO₂をコンパクトな設備で効率よく回収できる「C2SPキルン®」の開発を進めている¹⁾。回収したCO₂の有効利用方法の一つとして、メタネーション技術によって排ガス中のCO₂を原料として合成メタンを製造し、セメント製造のエネルギー源として循環利用することを想定している。天然ガスの

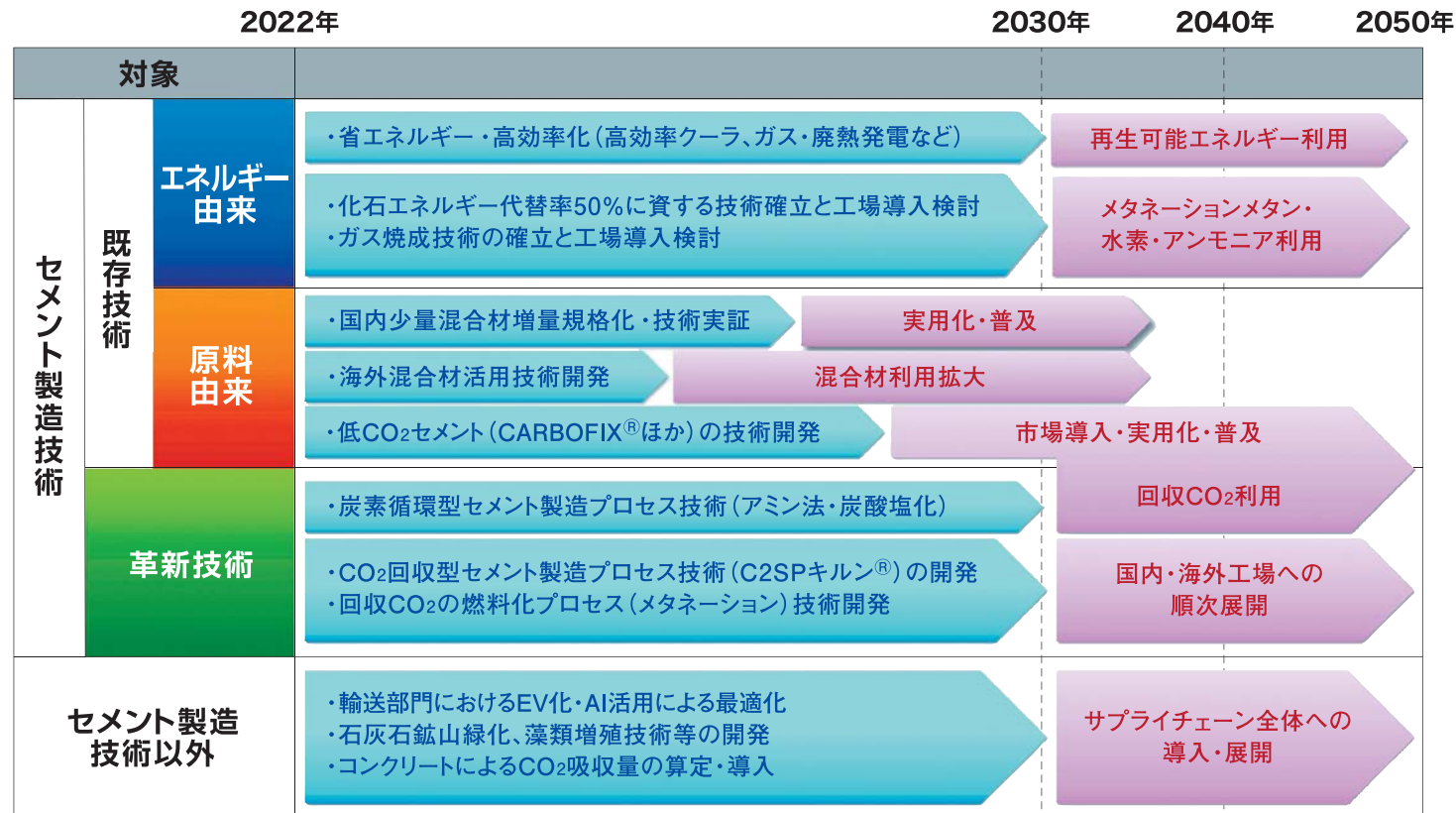


図-1 カarbonニュートラル戦略2050技術開発ロードマップ

表-1 天然ガス、石炭および重油の性状の比較²⁾

項目	天然ガス(LNG)	石炭(輸入一般炭)	重油(A重油)
総発熱量[MJ/kg]	54.70	26.08	46.38
炭素排出係数[g-C/MJ]	13.87	24.29	19.32
硫黄分	無し	有り	有り
窒素分	無し	有り	有り

主成分はメタンであるため、天然ガスによる焼成技術は、そのまま合成メタンにも適用することができる。また、天然ガスで得られた知見やノウハウは、アンモニアや水素といった他のガス燃料にも応用可能である。

以上のように、ガス焼成技術は短・中期的な観点からCO₂削減を図るだけでなく、将来的にセメント製造プロセスのカーボンニュートラルを実現するために重要な役割を担っている。本稿では、ガス焼成技術の確立に向けた取り組みの一環として、当社のテストキルンにおける天然ガスの燃焼試験結果について紹介する。

2. 天然ガスの特徴と課題

2-1 性状

メタンやメタンを主成分とする天然ガスは、石炭と性状や燃焼特性が異なるため、その特徴に応じた燃焼管理が必要となる。

表-1に、天然ガス、石炭、および重油の比較を示す。天然ガスは、石炭や重油と比較して炭素排出係数が小さく、同じ熱量の石炭の半分程度となる。また、硫黄分を含まないため、硫黄酸化物(SO_x)は発生しない。窒素酸化物(NO_x)については、窒素分由来のFuel NO_xは発生しないが、後述のように空気中の窒素由来の、Thermal NO_xは発生しうる。

2-2 燃焼性

石炭は、熱分解によって気相に放出された揮発分の燃焼(揮発分燃焼)過程と、固定炭素と呼ばれる固体の燃焼(チャー燃焼)過程からなる³⁾。揮発分燃焼は速やかに終了するが、チャー燃焼には時間がかかり、燃焼反応全体の律速過程と

表-2 試験で使用した天然ガス(都市ガス13A)の組成

項目	単位	組成	
組成	メタン	vol%	88.86
	エタン	vol%	6.88
	プロパン	vol%	3.09
	ブタン	vol%	1.17
低位発熱量	MJ/Nm ³	40.4	

炎となりやすい天然ガスでは火炎からクリンカーへの輻射伝熱が低下し、品質や熱量原単位に悪影響を及ぼす可能性がある。

以上のことから、天然ガス焼成技術の確立にはキルン内熱履歴、NO_x生成挙動およびクリンカー品質への影響を把握し、その対策を検討することが重要となる。

3. 実験概要

3-1 試験設備

当社では、天然ガスをはじめとするガスエネルギーの燃焼特性の把握と焼成技術の開発に向けて、テストキルンを活用した燃焼試験を実施している。

図-2に試験設備の概略図、表-2に試験で使用した天然ガスの組成を示す。試験では直径450mm、長さ8,340mmのロータリーキルン(以下、キルン)に挿入したバーナから約1,300MJ/h相当の天然ガスと、その燃焼用空気を投入し、キルン内ガス温度分布やキルン後段(以下、窯尻)の排ガス組成を計測した。また、バーナ中央からプローブを挿入し、バーナ近傍の排ガス組成を計測した。

試験で使用するバーナは多重管構造となっており、円環状のガス流路と複数の燃焼用空気流路が配置されている。各流路は、それぞれ独立に天然ガスや空気の供給量を調整でき、旋回角度や

なる。一方、天然ガスの燃焼は、気相燃焼のみであることから石炭よりも早期に燃焼が完了する。その結果、石炭から天然ガスに切り替えた際にキルンバーナ側に高温部が偏る傾向となることが想定される⁴⁾。このキルン内温度分布の変化によってセメントクリンカーを構成する鉱物の変化が生じ、品質に影響を及ぼすことが懸念される。また、局所的な高温域が生じることで、Thermal NO_xの生成を助長する燃焼環境となる可能性がある。

2-3 火炎特性

火炎には大きく分けて輝炎と不輝炎の2種類がある。石炭(固体)や重油(液体)は、火炎中の煤や固体微粒子群が発光体となって燃焼時に黄橙色に輝く炎を形成する。これを輝炎という。一方、天然ガス(気体)は煤の生成が少ないため、透明あるいは青みを帯びる程度の炎となりやすい。これを不輝炎という。

キルン内における火炎と原料間の熱伝達の大部分は、火炎からの輻射伝熱によるものである。輝炎の輻射は、不輝炎の輻射に比べて著しく強い。従って、輝炎の形成がクリンカー焼成に重要な役割を担うといわれている⁴⁾。一方、不輝

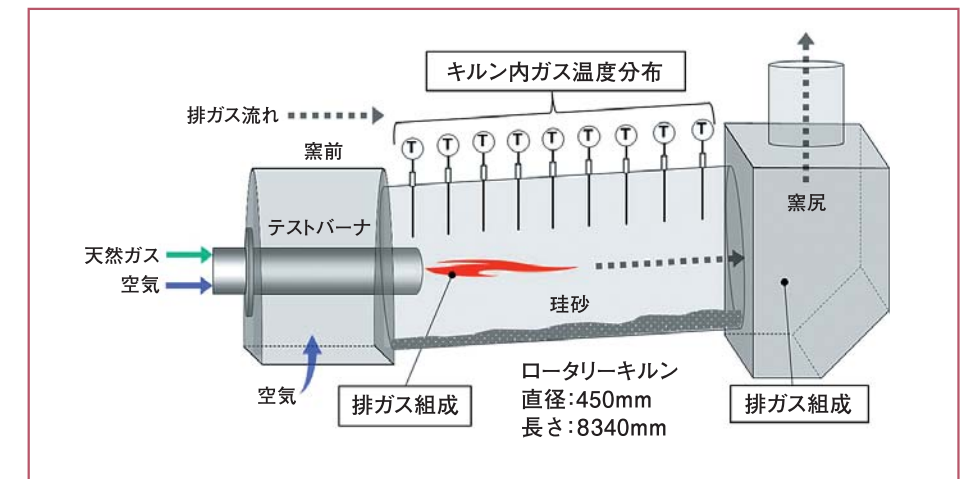


図-2 試験設備の概略図

先端流速の変更が可能な仕様としている。天然ガスはバーナ軸方向に対して一定の旋回角度を有する円環状の流路から投入し、燃焼用空気は天然ガス流路の内外に配置した円環状の流路から投入される構造となっている。

3-2 試験水準

表-3に試験水準を示す。本稿では天然ガス専焼と、その比較対象としてA重油専焼について紹介する。水準1と2は天然ガス専焼であり、バーナ条件としてモメンタム比を変更した。ここで、モメンタム比とは天然ガスと空気の混合性を表す指標であり、本試験では燃料流と空気流の運動量の比として以下の式によって定義した。

$$\varepsilon = \frac{G_f \cdot v_f}{G_a \cdot v_a}$$

ここに、 ε ：モメンタム比

G_f ：燃料流の流量 [kg/s]

G_a ：空気流の流量 [kg/s]

v_f ：燃料流の噴出速度 [m/s]

v_a ：空気流の噴出速度 [m/s]

なお、燃料流および空気流の運動量は、それぞれバーナ軸方向と周方向のベクトル成分に分けて算出し、それらを合成した値を用いた。

水準3はA重油専焼であり、天然ガス専焼と投入熱量が同等となるように燃料供給量を調整した。以下、天然ガス専焼の水準1と2をそれぞれ低 ε と高 ε 、A重油専焼の水準3をA重油と呼称する。

4. 結果と考察

4-1 キルン内温度分布

図-3は各水準のキルン内温度分布を示している。低 ε ではバーナ近傍で局所的に高いピークが生じた。一方、高 ε ではピークがなだらかになり、A重油と同等の温度分布となった。これらのピーク温度の傾向は、バーナ近傍におけるガスと空気の混合性の影響を受けていると考えられる。

図-4は天然ガス専焼水準におけるバーナ近傍の酸素濃度とメタン濃度を示している。低 ε ではバーナ近傍の酸素濃度が高く、メタン濃度が低い。これは天然ガスの運動量に対して空気の運動量が相対的に大きいため、空気の混合とそれに伴う燃焼反応が促進し、メタンが消費されたためと考えられる。その結果として、高いピーク温度を示したと考えられる。一方、高 ε ではメタン濃度が高く、酸素濃度が低い。これは低 ε の場合とは逆に、メタンと空気との混合性が低下し、燃焼反応が抑制されたためと考えられる。

以上の結果から、キルン内温度分布は天然ガスと空気の初期混合の影響を受けており、その混合性の指標となるモメンタム比の変更によって調整可能であると考えられる。従って、キルン内熱履歴の変化に対してはバーナ条件の工夫によって対応可能といえる。

4-2 NOx生成挙動

図-5は各水準の窯尻排ガス中のNOx濃度の比較を示している。A重油と比較すると、低 ε ではNOx濃度が高く、高 ε ではNOx濃度が低い。これらの傾向は、

表-3 試験水準

No.	水準名	燃料	モメンタム比 ε
1	低 ε	天然ガス専焼	0.23
2	高 ε		1.31
3	A重油	A重油専焼	-

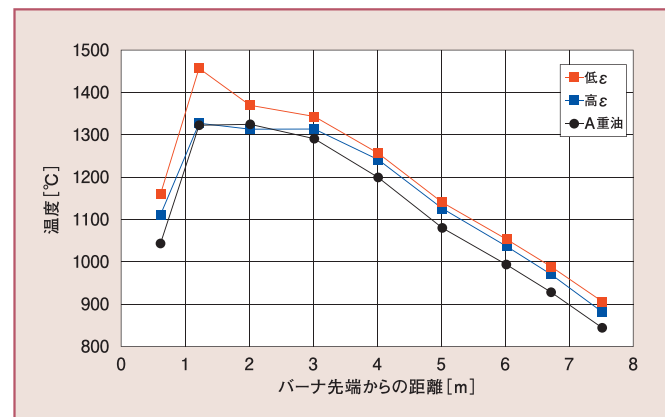
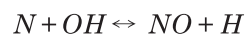


図-3 キルン内ガス温度分布

代表的な Thermal NOx の生成機構である Zeldovich NO の影響によるものと考えられる。

Zeldovich NO とは、以下に示す反応式によって生成するNOを指す⁵⁾。



これらの反応式によるNOの生成は温度と酸素濃度に依存し、高温または高酸素雰囲気下で増加する傾向がある⁵⁾。従って、低 ε ではバーナ近傍の酸素濃度が高く、局所的な高温雰囲気が生じたことから、NOx濃度が増加したと考えられる。一方、高 ε では酸素濃度が低下し、それに伴い燃焼温度が低下したこ

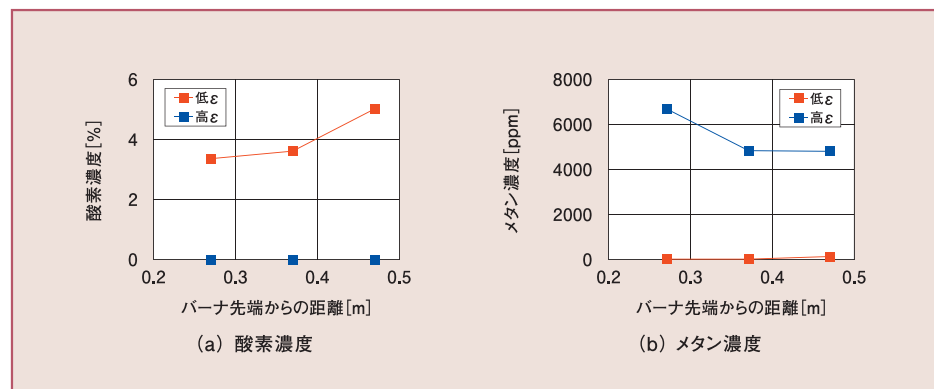


図-4 バーナ近傍のガス組成

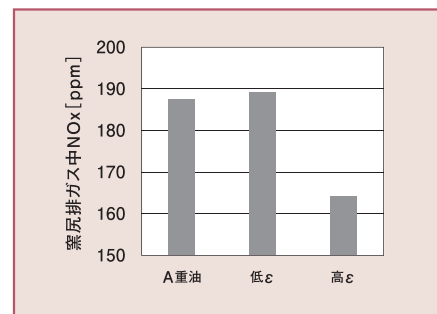


図-5 窯尻排ガス中のNOx濃度

とによって、NOx濃度が低減したと考えられる。

これらの結果から、天然ガスと空気の初期混合を制御し、バーナ近傍の酸素濃度の増加とそれに伴うピーク温度の過上昇を抑制することはNOx低減にも有効であるといえる。

ただし、天然ガス燃焼に伴うNOxは複雑な生成機構を有し、バーナ条件によっては上述のようにピーク温度の観点から一概に説明できるとは限らない⁶⁾。現在、天然ガス燃焼時のNOx生成挙動の解明と低NOx化に向け、様々なバーナ条件での燃焼試験を実施し、解析を進めている。

4-3 火炎特性

図-6はA重油専焼時と天然ガス専焼時のキルン内の燃焼状況を示している。A重油専焼時は輝炎となった一方、ガス火炎では不輝炎となる様子が確認された。不輝炎の形成による輻射伝熱の低下については、実運用上はキルン内を流れる原料等から飛散するダストが輻射源

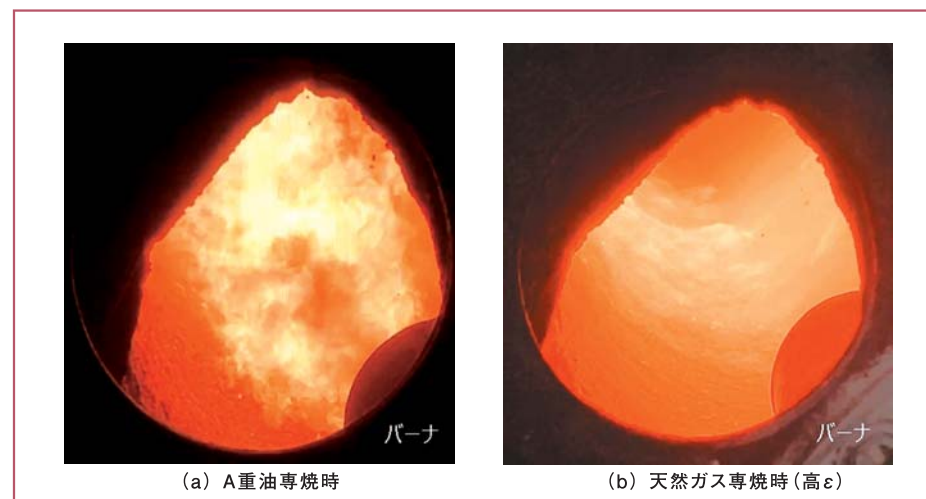


図-6 燃焼中のキルン内部の様子

となって、クリンカー品質への影響が緩和されることも想定される⁷⁾。従って、現在テストキルンにおけるクリンカー焼成試験等を実施し、火炎特性の変化が品質に及ぼす影響を調査している。

5. おわりに

本稿ではガス焼成技術の確立に向けた取り組みの一環として、テストキルンにおける燃焼試験結果について紹介した。当社では、これ以外にも熱流体シミュレーションを駆使してキルン内の複雑で過酷な燃焼環境を模擬し、天然ガスの燃焼方法の最適化検討を行っている。今後は、テストキルンにおけるパイロット試験とシミュレーションの両側面からガス焼成技術の確立に向けた知見を積み上げていく予定である。そこで得られた知見と試験手法のノウハウは、天然ガスや合成メタンのみに活用を留めず、アンモニアや水素といったカーボンフリーエネルギー等の多様なエネルギー源を用いた焼成技術の検討へと応用・発展させていく予定である。

【参考文献】

- 1) 太田亨, 木村貴之, 本間健一: 太平洋セメントのカーボンニュートラルに向けた研究開発-第5回-CO2回収型セメント製造プロセスの開発, 太平洋セメント技術情報誌CEM'S, No.97, 2023
- 2) 経済産業省資源エネルギー庁HP: https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/carbon.html (2023.10.24参照)
- 3) 日本エネルギー学会: 石炭の科学と技術, コロナ社, pp.178-179, 2013

- 4) Syed Suhail Akhtar, Eric Ervin, Shan Raza and Tahir Abbas: "From coal to natural gas: Its impact on kiln production, Clinker quality and emissions", 2013 IEEE- IAS/PCA Cement Industry Technical Conference, Orlando, FL, USA, pp.194-199, 2013
- 5) 新岡嵩, 河野通方, 佐藤順一: 燃焼現象の基礎, オーム社, pp.259-260, 2001
- 6) 下田翔, 北澤健資, 寺崎淳一: セメントキルンにおける天然ガス燃焼時のNOx生成挙動の調査, 第77回セメント技術大会講演要旨, 2023
- 7) Gaël Le Piver, and Tom Lowes, Stepping on the gas, World Cement, May, p.61, 2019

しもだ・しょう

【著者略歴】

2020年 太平洋セメント株式会社入社
現在 同社中央研究所セメント・コンクリート研究部プロセス技術チーム

きたざわ・けんすけ

【著者略歴】

2006年 太平洋セメント株式会社入社
現在 同社中央研究所セメント・コンクリート研究部プロセス技術チーム

てらさき・じゅんいち

【著者略歴】

1994年 日本セメント株式会社
(現 太平洋セメント株式会社) 入社
現在 同社中央研究所セメント・コンクリート研究部プロセス技術チームリーダー