

コークス炉放散ブリーダー高効率燃焼技術の開発

Development of Highly Efficient Combustion in Coke Oven Bleeder Pipe

川畑 聡志 KAWAHATA Satoshi JFE スチール 東日本製鉄所 (千葉地区) エネルギー部 エネルギー技術室 主任部員 (副課長)
川島 知之 KAWASHIMA Tomoyuki JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 主任研究員 (副課長)
柿沼 友行 KAKINUMA Tomoyuki JFE スチール 東日本製鉄所 (千葉地区) 製鉄部 コークス技術室 主任部員 (副課長)

要旨

コークス炉放散ブリーダーは C ガスの漏洩や異常燃焼を防止するための保安設備であるが、稼働時 (燃焼放散時) に黒煙 (すす) が発生するという問題があった。また、すすの生成機構については種々の研究がなされているが、十分に解明されていないという課題もある。本検討では燃焼実験およびシミュレーション解析を用いてすす発生を抑制するメカニズムを解明し、黒煙発生を低減する放散ブリーダー高効率燃焼技術を開発した。本技術を JFE スチール全地区に導入することにより、黒煙の発生を抑制した。

Abstract:

Coke oven dissipation bleeder is an emergency equipment to prevent leakage of surplus coke oven gas and to combust it safely. One of serious problems at flaring is generation of large black smoke. Black smoke contains a large amount of soot which is caused by thermal decomposition of coke oven gas. Various studies have been conducted on the mechanism of soot formation, but it has not been fully elucidated in commercial flaring equipment. In this study, we elucidated the mechanism of suppressing soot generation using combustion experiments and numerical simulation and developed a technology for a smokeless dissipation bleeder by promoting combustion. This technology has been introduced to all coke ovens in JFE Steel and contributed to suppressing the generation of black smoke.

1. はじめに

コークス炉は石炭を乾留してコークスを製造するとともに、石炭の乾留過程で発生したコークス炉ガス (以下、C ガス) を回収する設備である。コークス炉で発生した C ガスは、ブロワによって、ドライメーン、サクシオンメーンを通してガス精製設備へと送られている。

しかし、停電等のトラブルにより吸引ブロワや C ガス精製設備が停止した際は C ガスを回収できなくなる。設備停止により C ガスを回収できなくなっても、コークス炉の炉体温度は急激には下がらないため、石炭の乾留は継続し、C ガスが発生し続ける。C ガスが発生し続けると炉内圧力および配管内圧力が上昇し、レンガ目地からの C ガス漏洩や異常燃焼が起こる可能性がある。

そこで、これらのトラブルを防止するための保安設備として放散ブリーダーが設置されている。放散ブリーダーはドライメーンに設置されており、開放して C ガスを放散することでドライメーン圧力および炉内圧力を低下させる。また、放散時には C ガスを燃焼させることで無害化させている。

放散ブリーダーの基本燃焼構造を **図 1** に示す。一般的な

放散ブリーダーの燃焼方法は、C ガスがブリーダー管から供給され、燃焼用空気は放散ブリーダー先端にフードを設けて、ブリーダー管とフードの隙間から自然に大気を吸込むことで供給される。しかし、この燃焼方法では燃焼放散時に黒煙 (すす) が発生する。そこで、燃焼実験および数値解析により黒煙低減メカニズムを解明し、黒煙低減燃焼技術を開発した。

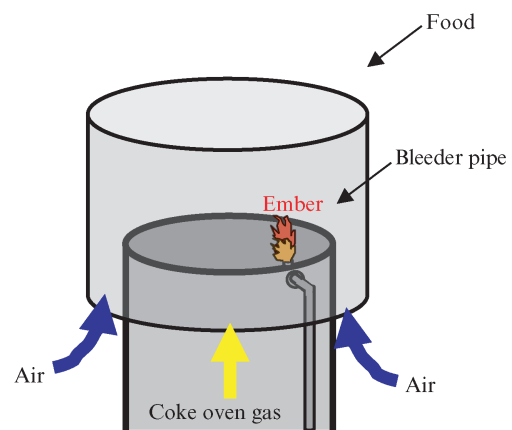


図 1 放散ブリーダー燃焼構造

Fig. 1 Combustion structure of bleeder pipe

2023 年 9 月 8 日受付

2. 黒煙低減燃焼の検討

2.1 黒煙発生原因

黒煙は、すす粒子が凝集して目に見えるようになったものである。すすの生成機構については、種々の研究がなされているが、まだ十分に解明されていない。しかし、炭化水素の燃焼反応ですす粒子が生成されることは明らかであり、炭化水素は高温の空気不足状態で燃料分子の熱分解を起し、すす粒子を生成する。

拡散燃焼は燃料と酸化剤が燃焼場へ別々に供給される燃焼で、その火炎形態を拡散火炎と呼ぶ。拡散火炎では、比較的低温かつ酸素不足の所で熱分解が起るため、燃料の構造の影響を直接に受ける。拡散火炎における燃料の種類とすすの生成しやすさを表1に示す。なお、Rankが大きいほど、生成しやすいことを意味する。精製後のCガスは比較的すすが生成しにくい(Rank4)が、タールは非常にすすが生成しやすい(Rank12)ため、タール分を含んだ精製前のCガスはすすが生成しやすいと考えられる。

放散ブリーダーは拡散火炎であり、図2のような火炎構造であると考えられる。拡散火炎は燃料と空気の接触面に火炎が形成されることから、火炎内部は燃料のみが存在する未燃状態となる。したがって、炭化水素ガスの燃焼においては火炎内部ですす粒子が生成する。生成したすす粒子は成長しながら上昇し、反応帯(火炎)へと到達する。反応帯に到達したすすは酸化反応により酸化されるが、反応しきれずに外へ飛び出したすす粒子の集合体は、冷やされて黒く見える黒煙となる。まとめると、拡散火炎は火炎内部が未燃状態となり、すす粒子が生成し、反応帯で十分に酸化しきれず黒煙となるということである。

ここで、拡散燃焼におけるすす生成速度の式(1)とすす酸化速度の式(2)を以下に示す¹⁾。黒煙発生量はすす生成速度とすす酸化速度のバランスで決まる。

$$S_f = 2.54 \times 10^6 \cdot \frac{2gr_B}{u_f^2} \cdot p_f \cdot \left(\frac{1}{m}\right)^3 \exp\left(\frac{-20\,000}{T}\right) \dots (1)$$

$$S_b = 3.6 \cdot m_s \cdot \frac{p_0}{\sqrt{T}} \cdot \exp\left(\frac{-20\,000}{T}\right) \dots (2)$$

2.2 黒煙低減燃焼方法

黒煙を低減させる燃焼方法について検討した。2.1節より、炭化水素ガスが高温場で空気不足状態となることにより熱分解が起り、すすが生成される。したがって、すす生成を低減させる燃焼方法として以下が有効であると考えられる。

- ① 高温場を作らないように、火炎温度を低下させる。
- ② 空気不足状態を作らないように、酸素の供給量を増加(燃焼促進)させる。

表1 燃料の種類とすすの生成しやすさ

Table 1 Fuel type and difficulty of soot generation

Rank	Fuel	Rank	Fuel
1	Natural gas	7	Coke
2	LPG	8	Lignite
3	Production gas	9	Low volatility bituminous coal
4	Coke oven gas	10	Crude oil
5	Kerosene	11	High volatility bituminous coal
6	Diesel	12	Tar

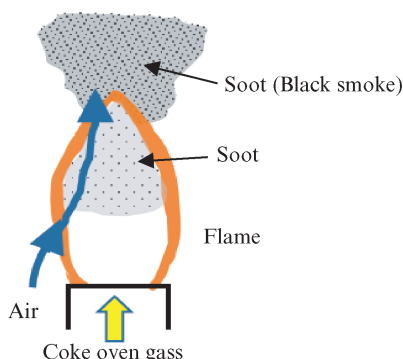


図2 拡散火炎構造

Fig. 2 Structure of diffusion flame

まずは①火炎温度低下効果について検討した。式(1)、式(2)からその効果を試算した結果を図3に示す。火炎温度はCガスの断熱火炎温度とし、黒煙発生率はすす生成速度÷すす酸化速度で評価した。現状の断熱火炎温度での黒煙発生率を100%とすると、火炎温度を低下させることで黒煙発生率は低下する。したがって、火炎温度の低下は黒煙低減につながると考えられる。

火炎温度を低下させる方法として蒸気の吹込みがある。

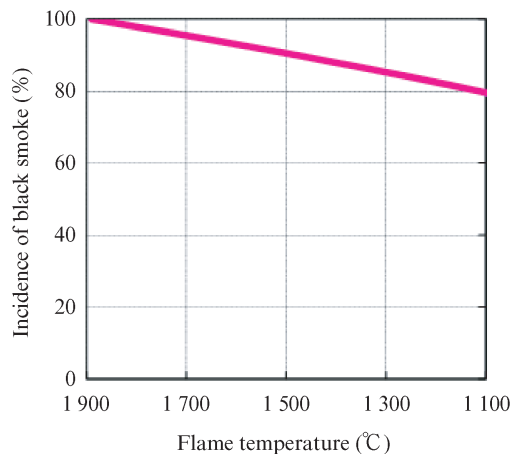


図3 火炎温度と黒煙発生率の関係

Fig. 3 Relationship between incidence of black smoke and flame temperature

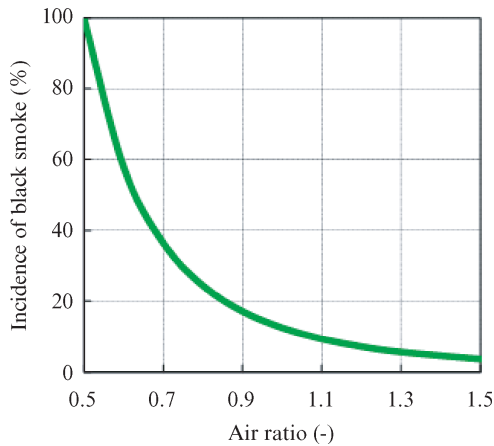


図4 空気比と黒煙発生率の関係

Fig. 4 Relationship between incidence of black smoke and air ratio

これは、すでに JFE スチール東日本製鉄所（京浜地区）でも導入している、最も一般的な黒煙低減燃焼技術であるが、黒煙を完全に抑止することはできない。

次に、酸素の供給量を増加させる②燃焼促進効果について検討した。式 (1)、式 (2) からその効果を試算した結果を図4に示す。空気比を増加させることで黒煙発生率は大きく低下している。図3と図4を比較すると空気比を増加させたときの黒煙発生率の低下幅の方が火炎温度を低下させたときよりも大きいことから、火炎温度低下よりも燃焼促進による黒煙低減効果の方が大きいと考えられる。

このことから、一般的に火炎温度低下のために蒸気を用いているが、よりコストの安い空気を用いて、より効果のある黒煙低減燃焼が可能であると考えられる。

2.3 燃焼実験

ラボ実験により黒煙低減効果の高い燃焼方法を明らかにした。ラボ実験装置として実機サイズの1/8スケールのブリーダーモデルを使い、精製後Cガスに気化したベンゼンを混合した燃料を用いて黒煙発生を再現した。



燃焼方法は次の①～④の4つの燃焼方法とし、蒸気および空気を吹込んで燃焼させた。

- ① 通常燃焼: 流体吹込み等なし
- ② 予混合燃焼: ブリーダー内に流体を吹込んであらかじめ燃料と混合させる
- ③ エゼクター燃焼: 流体を吹込んでエゼクター効果を利用して大気を取込む
- ④ 火炎混合燃焼: ブリーダー先端中心から垂直上向きに火炎に向かって流体を吹込む

評価方法としては、黒煙低減量は目視確認とし、燃焼状態については火炎温度（ブリーダー中心先端から 100 mm

表2 火炎温度低下実験結果

Table 2 Experimental results of flame temperature drop

Combustion method	① Normal combustion	② Premixed combustion
Injection	-	Steam
Combustion state (Amount of black smoke)		
Flame temperature	490°C	400°C

上の位置)により確認した。

まずは火炎温度低下効果を調査した。燃焼方法は①通常燃焼と②予混合燃焼、吹込み流体は蒸気で実験し、比較した。実験結果を表2に示す。①通常燃焼に比べて、蒸気を吹き込んだ②予混合燃焼は火炎温度が490°Cから400°Cに低下した。火炎温度の低下により黒煙量が低減されたが、黒煙の発生を完全に抑止することはできなかった。

次に、燃焼促進効果を調査した。燃焼方法は4つすべてとし、吹込み流体は空気を用いた（空気流量はすべて同じとした）。実験結果を表3に示す。

②予混合燃焼については①通常燃焼より火炎温度が40°C低下していることから、燃焼は促進していないと考えられる。そのため黒煙低減効果はほとんど得られなかった。

③エゼクター燃焼については火炎温度が850°Cになり、通常燃焼よりも360°C上昇した。火炎温度が上昇したのは空気が十分に供給されて燃焼が促進したためと考えられる。その結果、黒煙は低減し、完全に発生を抑止できた。

④火炎混合燃焼については火炎温度が600°Cになり、通常燃焼よりも110°C上昇した。③と同様に空気が供給されて燃焼が促進したためと考えられる。黒煙量については低減したが、完全に抑止することはできなかった。

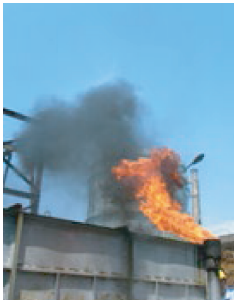



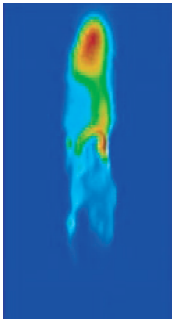
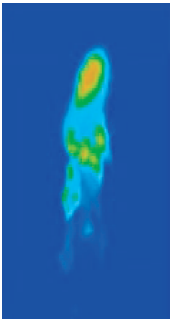
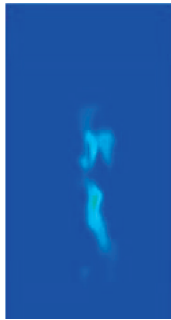
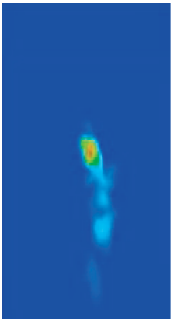
以上より、火炎温度低下よりも燃焼促進の方が黒煙低減効果が大きく、③エゼクター燃焼方法を用いることで、効率よく（空気流量を少なく）黒煙を低減できることが分かった。また、従来の蒸気を用いた黒煙低減燃焼ではなく、より安価な空気を用いた黒煙低減燃焼が可能であることも分かった。

2.4 シミュレーション解析

燃焼促進による黒煙低減効果を検証するため、ラボ実験の①～④と同様の燃焼方法ですす発生のシミュレーションを行い、すす発生量を比較するとともに、エゼクター燃焼にお

表 3 燃焼促進実験結果

Table 3 Experimental results of combustion acceleration

Combustion method	① Normal combustion	② Premixed combustion	③ Ejector combustion	④ Flame mixing combustion
Injection	–	Air	Air	Air
Combustion state (Amount of black smoke)				
Flame temperature	490°C	450°C	850°C	600°C
Soot volume fraction				

ける黒煙低減メカニズムを解明した。

本開発では鉄鋼製造プロセスの燃焼シミュレーション適用に実績のある、非構造格子系の有限体積法コード Front Flow Red-Comb (NuFD/FFR extended by Kyushu University, CRIEPI, Kyoto University and NuFD) を用いた²⁾。支配方程式は、Faver フィルターを施した連続の式、ナビエ・ストークス式、エネルギー保存の式および、各化学種の質量保存の式で構成される。拡散火炎と拡散火炎によるすすの発生は非定常性が強いので、乱流モデルには LES を用い SGS 成分のモデル化には Dynamic smagorinsky モデルを用いた^{3,4)}。圧力と速度の補正には SMAC 法を用いた。移流項の離散化は 2 次中心差分と 1 次風上差分を 95:5 の割合で混合した。時間発展アルゴリズムには 1 次 Euler 陰解法を用いた。時間刻みは $dt=1.0\text{ ms}$ とし、計算開始から 20 000 ステップを助走区間とし、20 000 ステップから 25 000 ステップの間での平均値をとり、統計量を算出した。

乱流燃焼モデルには LES の SGS 成分の影響を考慮するために Scale similarity filtered reaction rate model (SSFRM)⁵⁾ を採用した。すすの発生モデルに関しては、Wen らが提案したアセチレン前駆体モデル⁶⁾ を用いた。解析形状と境界条件を図 5 に示す。空気の吹込み条件は実験と同条件とした。

解析結果におけるすすの体積分率の瞬時値を表 4 に示す。解析結果も実験結果同様に、エセクター燃焼が最もすすの発生が少ないことが分かった。また、すすのピーク位置がエ

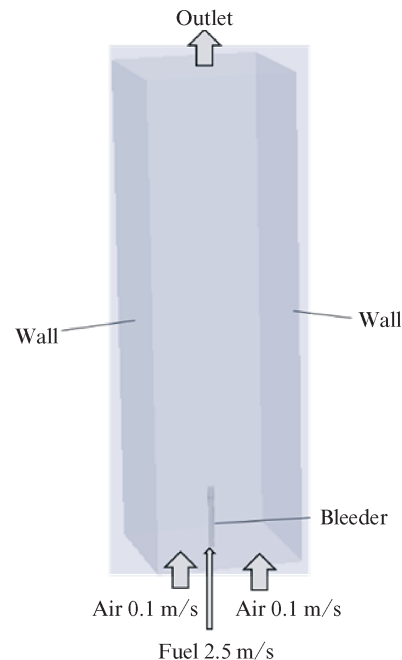


図 5 解析条件と境界条件

Fig. 5 Geometry of simulation

セクター燃焼以外の燃焼方式では、ブリーダー先端から離れたところにあることが分かる。これは表 2、表 3 で確認されている黒煙が火炎の先端から発生している現象を示している。

表4 実験結果とシミュレーション解析結果
Table 4 Experimental results and analysis results of simulation

	Smoke combustion	Smokeless combustion
Gas component		
Flame temperature	Center: 490°C Outer edge: 500°C	Center: 850°C Outer edge: 580°C
Temperature distribution and flow direction vector		

これらのことから、本数値シミュレーションはラボ実験を再現できていると考えられる。

2.5 黒煙低減メカニズム

ラボ実験およびシミュレーション解析から、エゼクター燃焼の黒煙低減メカニズムを明らかにした。表4に黒煙低減メカニズムのまとめを示す。

ラボ実験における火炎温度測定結果およびガス分析結果から、黒煙発生（通常燃焼）時は特に火炎中心位置でのガス未燃成分が多く、火炎温度も低い。一方で、黒煙発生抑制（エゼクター燃焼）時は火炎中心位置での火炎温度が高くなり、さらに未燃成分がゼロになっている。これらのことから、黒煙発生時は火炎内部で未燃が発生し、すすが生成して黒煙となっているが、燃焼を促進させて火炎中心位置まで完全燃焼させることで、黒煙発生を抑制できると考えられる。

次にエゼクター燃焼時の燃焼促進メカニズムを明らかにした。流量測定結果より、通常燃焼時のブリーダー管とフードの間隙から自然吸気によって供給される空気量は空気比0.05相当であり、未燃であると言える。エゼクター燃焼時の空気供給量は空気比0.05相当、ブリーダー管とフードの間隙からの吸気量はエゼクター効果により空気比0.2相当に増すが、燃焼空気量としては不十分である。

ここで、前述のシミュレーションにおけるブリーダー先端

付近の温度分布と流れの向きを示すベクトル図（表4下部）を比較した。通常燃焼ではフードの縁付近から上部に高温帯が生じている。これは、燃焼反応が燃料と周囲空気との界面でのみ生じていることを示しており、燃焼帯の内部の燃料は未燃のまま上昇している。エゼクター燃焼では、吹き込まれた空気によって周囲流体が巻き込まれている様子が確認できる。この吹き込み空気噴流の巻き込み効果により、周囲大気が火炎に向かって流れ込んでいる。このことで、不足分の燃焼空気がフード中心部まで供給され、フード中心部に高温帯が発生している。通常燃焼とエゼクター燃焼の温度分布の違いはラボ実験で得られる温度傾向と一致している。

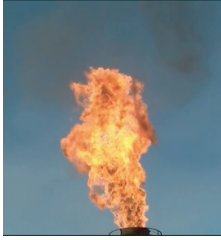
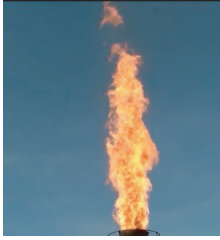
したがって、黒煙低減メカニズムはエゼクター燃焼によって周りの大気を火炎中心へ取込むような流れができ、黒煙発生時は未燃であった火炎中心まで燃焼空気が供給されることによって、燃焼が促進してすすの生成を抑制できたと考えられる。

3. 実機導入結果

エゼクター燃焼について実機での燃焼実験により効果検証した。表5に示すとおり実機においても空気を吹込むことで黒煙低減効果が得られることが分かった。また、火炎温度測定結果ではエゼクター燃焼の方が通常燃焼より火炎温

表 5 実機燃焼実験結果

Table 5 Experimental results of actual machine test

Combustion method	① Normal combustion	③ Ejector combustion
Injection	—	Air
Combustion state (Amount of black smoke)		
Flame temperature	634°C	925°C

度が高いことから、実機の場合もラボ試験と同様に燃焼が促進されて黒煙が低減したと考えられる。

さらに、本技術を実機へ適用し、実際に放散ブリーダーが稼働した際には、写真 1 に示すとおり黒煙を発生させることなく燃焼放散を実施できた。

4. おわりに

放散ブリーダーにおける黒煙発生は、燃焼放散火炎の内部が未燃状態であるため炭化水素が熱分解を起こし、すす粒子が発生し、成長して酸化されず放出することで起こる。すすの生成速度と酸化速度の式、燃焼実験およびシミュレーション解析から、黒煙低減には燃焼促進が有効であることが分かった。

これまで、黒煙低減燃焼技術としては蒸気吹込みによる火炎温度低下が一般的であったが、本開発により火炎温度低下による黒煙低減効果よりも、燃焼促進による黒煙低減



写真 1 実機稼働状況

Photo 1 Operational status of actual machine

効果の方が大きいことを明らかにした。燃焼促進方法としては空気を吹き込んで、周りの大気を火炎内側へと供給する流れを発生させるエゼクター燃焼方法が最も高効率で黒煙低減効果が高いことが分かった。本燃焼方法の適用により、空気による黒煙低減が可能であり、蒸気に比べて大幅にコストを削減できる。

参考文献

- 1) 新井紀男. 燃焼生成物の発生と抑制技術. テクノシステム, 1997. 571p (p. 259).
- 2) Kawashima, T.; Murao, A.; Yamamoto, N.; Ando, M.; Okada, J. Prediction of Pulverized Coal Combustion Behavior around Tuyere by Using LES and Extended CPD Model. ISIJ International. 2020, vol. 60, no. 5, p. 905-914.
- 3) Germano, M.; Piomelli, U.; Moin, P.; Cabot, W. H. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. Physics of Fluids. 1991, vol. 3, p. 1760-1765.
- 4) Lily, D. K. A proposed modification of the Germano subgrid scale closure method. Physics of Fluids. 1992, vol. 4, p. 633-635.
- 5) DesJardin, P. E.; Frankel, S. H. Large eddy simulation of a nonpremixed reacting jet: application and assessment of subgrid-scale combustion model. Physics of Fluids A. 1998, vol. 10, p. 2298-2314.
- 6) Wen, Z.; Yun, S.; Thomson, M. J.; Lightstone, M. F. Modeling soot formation in turbulent kerosene/air jet diffusion. Combustion and Flame. 2003, vol. 135, p. 323-340.