

◇論文◇

廃プラスチックの増量に向けた
キルンバーナの運転の適正化Optimizing Kiln Burner Operation for
Increased Feed of Waste Plastics佐野 雄哉*, 北澤 健資*,
寺崎 淳一**, 内藤 浩一***SANO, Yuya*; KITAZAWA, Kensuke*;
TERASAKI, Junichi**; NAITOU, Kouichi***

要 旨

本研究では、キルンの安定運転と廃プラスチックの増量を両立する条件を見出すため、熱流体シミュレーションを用いて、当社で開発したTaiheiyo Multi-Purpose(TMP)キルンバーナの運転条件が、廃プラスチックのキルン内落下率やキルン内燃焼挙動に及ぼす影響について評価した。その結果、TMPバーナの直進外流、旋回外流、旋回内流ポートの風速または風量の増加は、廃プラスチックの燃焼速度の増加、およびクリンカ表面への廃プラスチック落下量の減少に寄与することが確認された。また、直進外流の風量または風速の増加が、キルン内の発熱履歴やガス温度履歴に与える影響は小さく、従来の運転条件と同等のキルン内燃焼挙動が得られた。風量および風速が廃プラスチックの燃焼挙動に及ぼす影響度は、両者でほぼ同じであるものの、風量の増加はキルン内への大気流入量が多くなり燃費を悪化させるため、直進外流の風速を増加させることが最適な条件と考えられた。

キーワード : 熱流体シミュレーション, キルンバーナ, 廃プラスチック, 落下率, 燃焼

*中央研究所 第1研究部 プロセス技術チーム Process Technology Team, Research & Development Center

**中央研究所 第1研究部 プロセス技術チーム リーダー

Manager, Process Technology Team, Research & Development Center

***生産部 プロセス・システムグループ リーダー

Manager, Process & System Engineering Group, Production Department

ABSTRACT

This study evaluated the effects of operating conditions of the Taiheiyo Multi-Purpose (TMP) kiln burner on the drop rate and combustion behavior of waste plastics in the kiln by using the Computational Fluid Dynamics (CFD) in order to find the optimum conditions to achieve both of stable kiln operation and increased feed of waste plastics to the kiln burner. The results showed that increasing the air speed or volume at each air port of the TMP kiln burner accelerated the combustion of the waste plastics and decreased the amount of waste plastics dropping onto the clinker surface in the kiln. It was also found that increasing the speed or volume of the axial air had little effect on the heat generation and gas temperature profiles in the kiln, resulting in a combustion behavior equivalent to conventional performance. Although increasing the air volume had similar effects to increasing the air speed, the resultant increase in the air inflow into the kiln could affect the fuel consumption. These results suggested that the optimum conditions would be obtained by increasing the speed of the axial air.

Keywords : *Computational Fluid Dynamics (CFD), Kiln burner, Waste plastics, Drop rate, Combustion*

1. はじめに

セメント産業では原燃料の代替として、年間約2,740万トン(2019年度)の廃棄物・副産物を受け入れており¹⁾、当社でもさまざまな廃棄物を原燃料として活用している。その中でも、燃料代替となる廃棄物を受け入れた場合は、本来廃棄物焼却場で排出される二酸化炭素ガスの削減や埋め立て地の延命化などの社会的要求に応じることを意味しており、燃料代替となる廃棄物の活用拡大を強く推進している。燃料代替となる廃棄物のなかで、当社では特に廃プラスチック(以下、廃プラと略記)の利用割合(発熱量ベース)が最も大きい。廃プラは、2017年から開始された中国の廃棄物輸入規制の強化²⁾の影響で、すでに輸出量が激減しており、さらに2021年度に予定されているバーゼル法改正に伴う廃プラの輸出規制の強化³⁾により、国内に滞留する廃プラは更に増加する可能性がある。これらの社会情勢を背景に、廃プラをさらに活用する技術が求められている。

廃プラの燃焼性は、キルンの主燃料である微粉炭とは異なることが知られており⁴⁾⁵⁾、安易にキルンバーナから廃プラ投入量を増加させた場合、廃プラが完全燃焼せず原料の表面に落下しクリンカ品質が悪化する、または火炎形状の変化により耐火煉瓦が

熱的なダメージを受けて剥落するなどの悪影響が発生する可能性があるため、これらへの影響を最小にする必要がある。当社では、廃プラ活用技術の一つとして、廃プラを含む可燃性廃棄物の利用が可能なキルンバーナであるTaiheiyo Multi Purpose(以下、TMPと略記)バーナを開発し⁶⁾⁷⁾、すでに実機セメントキルンに導入され廃プラの活用に寄与している。しかしながら、今後想定される廃プラ投入量の増加に対応可能かは不明確であり、バーナの運転条件を検討する必要がある。一方、稼働中のキルンバーナの運転条件を変更することは、工程面や品質面に与える影響が大きいため、試行範囲が限定され最適な条件を見出すことは難しい。

このような背景から、筆者らは、熱流体シミュレーションを用いた検討を行っている。熱流体シミュレーションは、物理化学法則に従って、燃料の燃焼やガスの流れをコンピューター上で計算することができ、実機の改造を伴わずにさまざまな条件を変更可能で、迅速な解析が可能である。すでに、熱流体シミュレーションをセメント製造工程の解析に適用した事例は報告されており、実際に解析結果を実機改造に反映した例もある⁸⁾⁹⁾。そこで、本報告では、熱流体シミュレーションを用いてTMPバーナの運転条件が廃プラのキルン落下率、およびキルン内の燃

焼挙動に及ぼす影響について評価し、廃プラの増量に有効なTMPバーナの運転方法を検討した結果について報告する。なお、解析には汎用の流体解析コードとしてANSYS社のFLUENT ver. 19.0を用いた。

2. TMPバーナの概要

TMPバーナの先端の概略図をFig. 1に示す。TMPバーナは、廃プラおよび微粉炭とそれらを搬送する空気が流出するポートに加えて、直進外流、旋回外流、旋回内流と呼ばれる空気のみが流出するポートを有している。これらのポートから流出する空気は、以降で一次空気¹⁰⁾¹¹⁾と呼称する。旋回内流および旋回外流は、燃料や酸素の拡散を促すことで、燃料の燃焼を促進させる役割がある。直進外流は、クリンカクーラで回収された高温(1200K程度)の空気(以降、

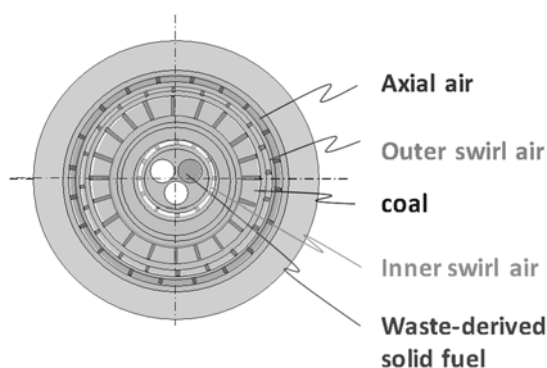


Fig. 1 TMP burner tip
(TMP バーナの先端)

二次空気¹⁰⁾¹¹⁾と呼称)の取り込みを促進することで、燃料の燃焼を促進する効果がある。本検討ではこれら空気ポートの風速、風量の変化が廃プラのキルン内落下率、および微粉炭や廃プラのキルン内での燃焼挙動に及ぼす影響について調査した。

3. 計算条件

3.1 キルン形状および運転データ

モデルキルンの形状をFig. 2に示す。対象キルンサイズは直径5m、長さ80mとした。二次空気の風量や温度などの運転データは、実機データを用いた。微粉炭、および廃プラの投入量は、それぞれ12.0、2.2t/h一定とした(熱エネルギー代替率20%)。なお、事前の検討において、キルン原料の有無が燃焼挙動に与える影響は小さかったことから、本検討ではキルン原料を投入しない設定で計算を行った。

3.2 微粉炭と廃プラの物性、および燃焼反応モデル

微粉炭と廃プラの物性値をTable 1に、微粉炭の粒度分布測定結果をFig. 3に示す。また、廃プラサンプルをFig. 4に示す。微粉炭と廃プラは、実機で使用されているものをサンプリングし、分析に供した。微粉炭の粒度分布は、レーザー回折式粒度分布測定装置(マイクロトラック・ベル社製、MT3300EX II)で測定した。ただし、シミュレーションでの粒度分布に関する入力値は、式(1)に示す累積確率分布関数⁹⁾のパラメータ(de, n)であるため、実測の粒度分布と近くなるようにこのパラメータを求めた。得ら

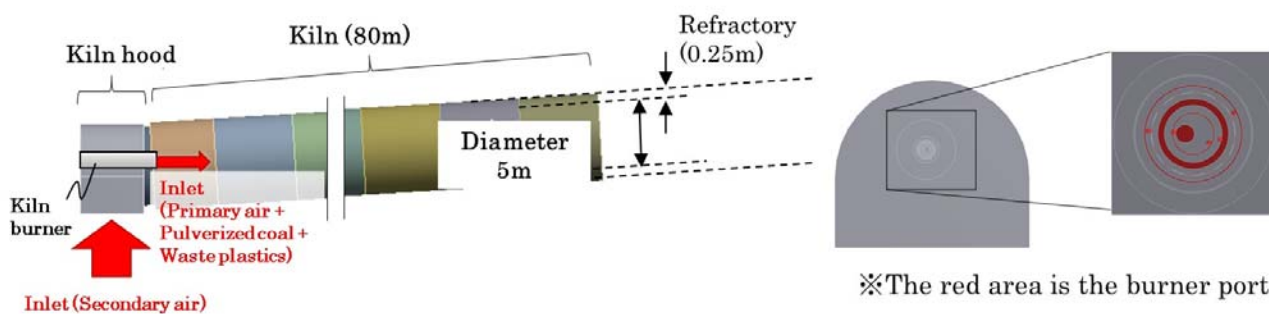


Fig. 2 Geometry of the kiln model
(モデルキルンの形状)

Table 1 Physical property values of pulverized coal and waste plastic
(微粉炭と廃プラの物性値)

		Coal	Waste plastics	Measuring method
Proximate analysis	Moisture(%)	0.5	0.3	JIS Z 7302 : 1999
	Ash(%)	11.9	11.1	JIS M 8812 : 2006
	Volatiles(%)	35.0	88.3	
	Fixed carbon(%)	53.1	0.3	
Ultimate analysis	C(%)	69.8	84.5	JIS M 8819 : 1997
	H(%)	5.3	13.5	
	N(%)	1.7	0.2	
	S(%)	0.5	0.0	JIS M 8813 : 2006
	O(%)	10.8	1.8	
Lower heating value(J/g)		27941	38859	JIS M 8814 : 2003
Density(g/cm ³)		1.35	1.22	JIS K 2151 : 2004

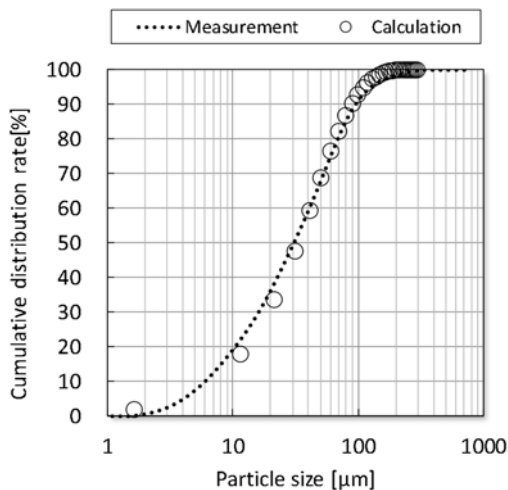


Fig. 3 Particle size distribution of pulverized coal
(微粉炭の粒度分布)



Fig. 4 Waste plastic sample
(廃プラのサンプル)

れたパラメータは $d_e = 4.46 \times 10^{-6} [m]$, $n = 1.12 [-]$ であり、参考までにこのパラメータを用いて算出した粒度分布を **Fig. 3** に併記する。廃プラの粒度は微粉炭と同様にさまざまであるが、本検討では廃プラの粒度を固定しても、水準間の比較に影響を与えないことから、単一粒度として扱った。粒径の設定にあ

たり、廃プラサンプル 30 粒の重量を 1 粒子ごと測定した後、その平均重量と密度から得られた体積相当径 3.8 mm として設定した。また、微粉炭および廃プラの燃焼反応モデルは、玉重、青山の検討モデル¹²⁾ を用いた。

$$F_{coal}(d_p) = 1 - \exp(-(d_p/d_e)^n) \quad \dots (1) \text{式}$$

ここに,

$$\begin{aligned} d_p &: \text{微粉炭の粒度} [\mu\text{m}] \\ F_{coal}(d_p) &: \text{粒径} d_p \text{のときの粒度累計} [\%] \\ d_e &: \text{幾何平均粒子径} [\mu\text{m}] \\ n &: \text{幾何標準偏差} [-] \end{aligned}$$

3.3 水準

水準を **Table 2** に示す。現状の実機運転条件をブランクとし、各水準の風量および風速はブランクを 1.0 としたときの相対比で示した。風速を増加させた条件では、風量が一定となるようにポートの開口面積を狭めた。一方、風量を増加させた条件では、風速が一定となるように開口面積を拡張し、さらに増加量分の二次空気を減じることで、キルン通風量を一定とした。また、一次空気の総モーメントを同表に示した。各ポートのモーメントは式(2)で示され、総モーメントは各ポートのモーメントの合計値である。

モーメント

$$= \text{ガスの質量流量} [\text{kg/s}] \times \text{風速} [\text{m/s}] / \text{供給熱量} [\text{MW}]$$

⋯⋯ (2) 式

3.4 評価項目

3.4.1 廃プラのキルン内落下率

廃プラのキルン内落下率は、廃プラ投入量とキルン内壁に落下した未燃廃プラ量から算出した。算出式を式(3)に示す。

$$\begin{aligned} \text{廃プラのキルン落下率} [\%] \\ &= \text{廃プラ落下量} [\text{kg/s}] \\ &\div \text{廃プラ投入量} [\text{kg/s}] \times 100 \\ &\dots (3) \text{式} \end{aligned}$$

3.4.2 ガス乱流強度分布

一般的に燃焼反応の形態は拡散燃焼と予混合燃焼の2つに大別されるが、キルン内での微粉炭および廃プラの燃焼は拡散燃焼に該当する¹³⁾。拡散燃焼における燃焼状況の把握、および操作は、その反応過程から燃料と酸化剤の混合性がきわめて重要である¹⁴⁾。この混合性を評価する指標として、ガスの乱流強度がある。ガス乱流強度はガス速度変動の2乗平均値で表わされるもので、乱流強度が高いほど燃料と酸化剤の混合性が高いことを示しており¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾、本検討では火炎への二次空気の取り込み速度が速いことを示している。

3.4.3 燃料の濃度分布

バーナの中心を通るキルン軸線から鉛直方向に断面を作成し、燃料の濃度分布を出力した。3.4.2項のガス乱流強度に加えて、燃料の拡散性も燃焼挙動に影響を与える重要な因子と考え、評価項目に加えた。

Table 2 Simulation cases (水準)

Item	Unit	Name							
		Blank	Case1-1	Case1-2	Case2-1	Case2-2	Case3-1	Case3-2	
Air flow rate	Axial air	-	1.0	1.0	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0
	Outer swirl air	-	1.0	1.0	1.0	1.0	2.1	1.0	1.0
	Inner swirl air	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0
Air flow velocity	Axial air	-	1.0	1.4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Outer swirl air	-	1.0	1.0	1.0	2.1	1.0	1.0	1.0
	Inner swirl air	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0
Total momentum of primary air		N/MW	4.4	5.4	5.7	5.0	5.0	5.0	5.0

3.4.4 ガス温度履歴および発熱履歴

ガス温度履歴および発熱履歴は、キルン軸線に対して直交に交わる断面をキルン軸線の5m間隔で作成し、それぞれの断面の平均値を出力した。発熱履歴の算出方法を式(4)に示す。

$$H_{Total}/\Delta L = \Delta H_{Total} \quad \dots (4) \text{式}$$

ここに、

H_{Total} :各ガス成分のエンタルピー量の合計(MW)

ΔL :サンプリング距離差(m)

ΔH_{Total} :発熱量(MW/m)

4. 結果と考察

4.1 廃プラ落下率, 燃料濃度, ガス乱流強度

廃プラ落下率を Fig. 5 に示す。また、廃プラ落下率のブランクとの差を総モーメントムのブランクとの差で除した単位総モーメントムあたりの落下率変化量を Table 3 に示す。いずれのポートでも、風量または風速の増加により落下率は減少し、また、風量の増加の方が落下率の減少に効果的であった。これは、燃料近傍のガス温度よりも供給される酸素量の増加の方が、燃料の燃焼に対して効果があったことを示している。ポートの種類別にみると、総モーメントムあたりの廃プラ落下抑制効果は旋回内流が最も高く、旋回外流および直進外流は同程度であった。ここで、燃料の濃度分布および乱流強度分布をそれぞれ Fig. 6 および 7 に示す。また、燃料の広がり幅を Fig. 8 に示す。燃料の濃度分布は増速条件と増量条件でほぼ同様であったため、代表として増速条件のみを示した。また、燃料の広がり幅は、燃料濃度が 0.01kg/m³ 以上の領域をバーナ先端から 1m ごとに測定した。直進外流の場合、乱流強度分布は他水準に比べ全体的に高いものの、燃料の広がり幅は最も小さかった。したがって、直進外流の風速または風量の増加により、火炎への二次空气の取り込み速度が増加することで燃料の燃焼が促進されたと考えられる。旋回外流および旋回内流では、ブランクと比べて乱流強度分布は大差ないものの、燃料の広がり幅は全体的に大きかった。これは、旋回外流および旋回内流の風量および風速の増加は、二次空气の取り込み速度には影響を与えず、バーナ半径方向外側への燃料の拡散を促進する効果があることを示しており、燃料の拡散により広範囲の酸素と接触

できたために燃焼が促進されたものと考えられる。

4.2 ガス温度履歴と発熱履歴

ガス温度履歴および発熱履歴を Fig. 9 に示す。いずれのポートでも、風量増加と風速増加の効果の差は認められなかった。直進外流のガス温度および発熱履歴は、ブランクと比べて、クリンカ落口から 10~25m の区間でやや高かった。これは、Fig. 7 に示したように、この区間の乱流強度がブランクよりも高く、二次空气の取り込み速度が増加し、燃料の

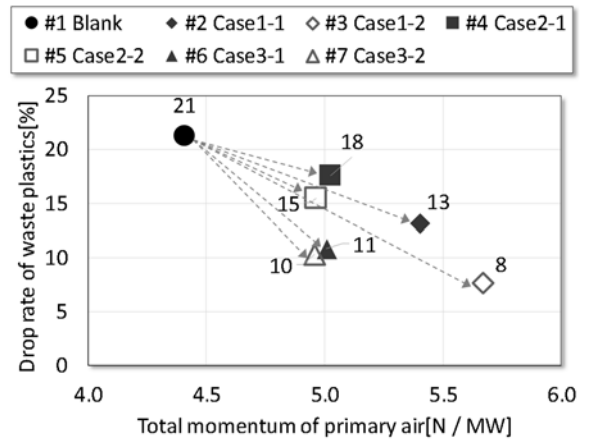


Fig. 5 Drop rate of waste plastics (廃プラのキルン落下率)

Table 3 Change in drop rate per total momentum of primary air (単位総モーメントムあたりの落下率変化量)

#1 Blank	-
#2 Case1-1	-8
#3 Case1-2	-11
#4 Case2-1	-6
#5 Case2-2	-10
#6 Case3-1	-17
#7 Case3-2	-20

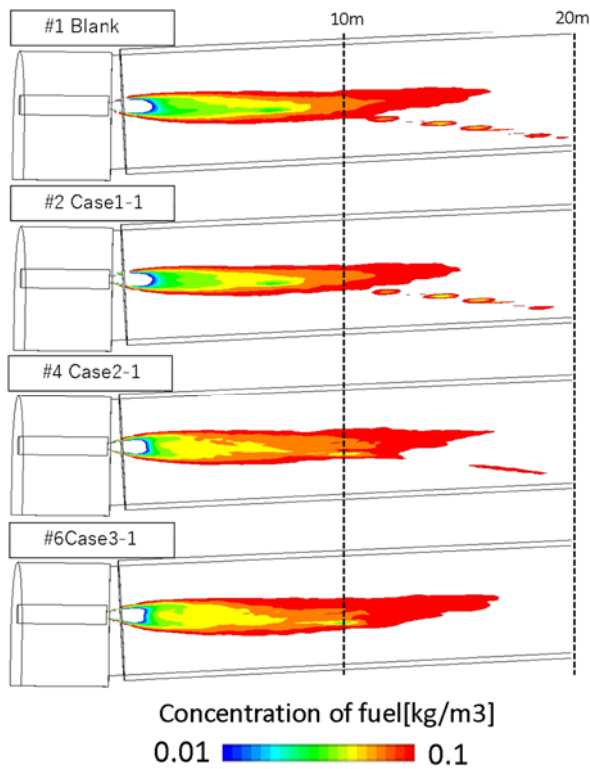


Fig. 6 Concentration distribution of fuel
(燃料の濃度分布)

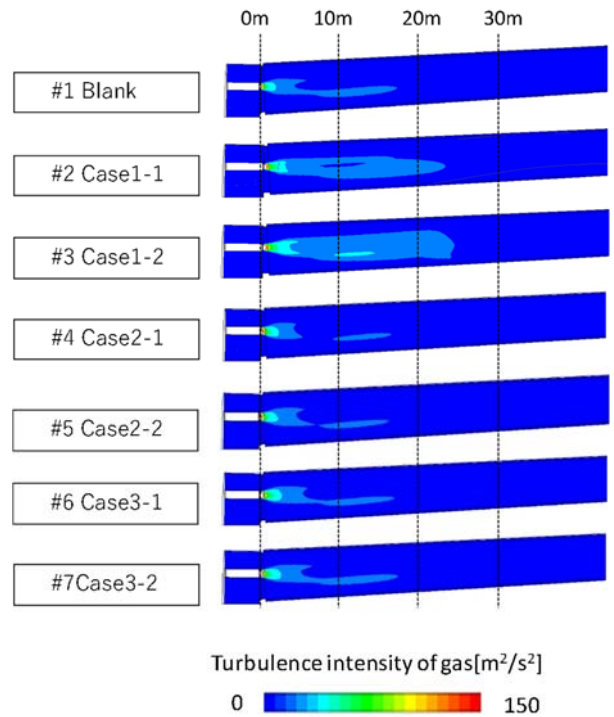


Fig. 7 Turbulence intensity distribution of gas
(ガス乱流強度分布)

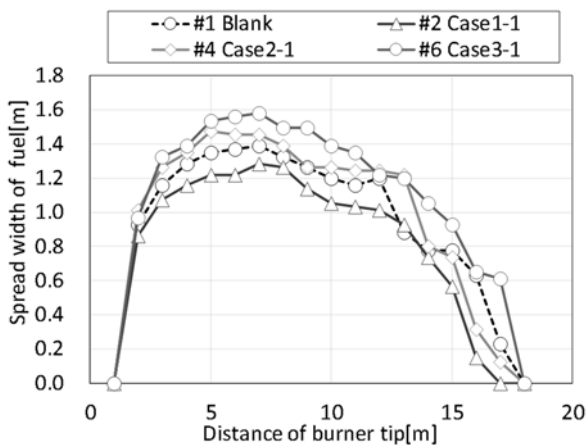


Fig. 8 Spread width of fuel
(燃料の広がり幅)

燃焼が促進したためであると考えられる。ただし、ガス温度および発熱履歴の増加量は小さく、直進外流の風量増加または風速増加をしても、本計算条件の範囲内では火炎長さや原料の温度履歴にはほとんど影響を与えないと考えられた。旋回外流と旋回内流はほぼ同じ傾向を示し、ブランクと比べて特にクリンカ落口から10mまでのガス温度、発熱量が顕著に増加し、極端な短炎化が発生していると考えられた。これは、**Fig. 8**に示したように、バーナ半径方向外側への燃料の拡散が大きく、広範囲の酸素との接触により燃焼が促進されたためと考えられる。極端な短炎化によりキルンの局所的な熱負荷が高くなると、キルン内壁の耐火物が溶損する、または耐火物の熱損耗が激しくなり、運転中に耐火物が剥落するリスクが高くなる。そのため、本検討の旋回内流および旋回外流の条件変更はキルンの安定運転性を損なう可能性がある。

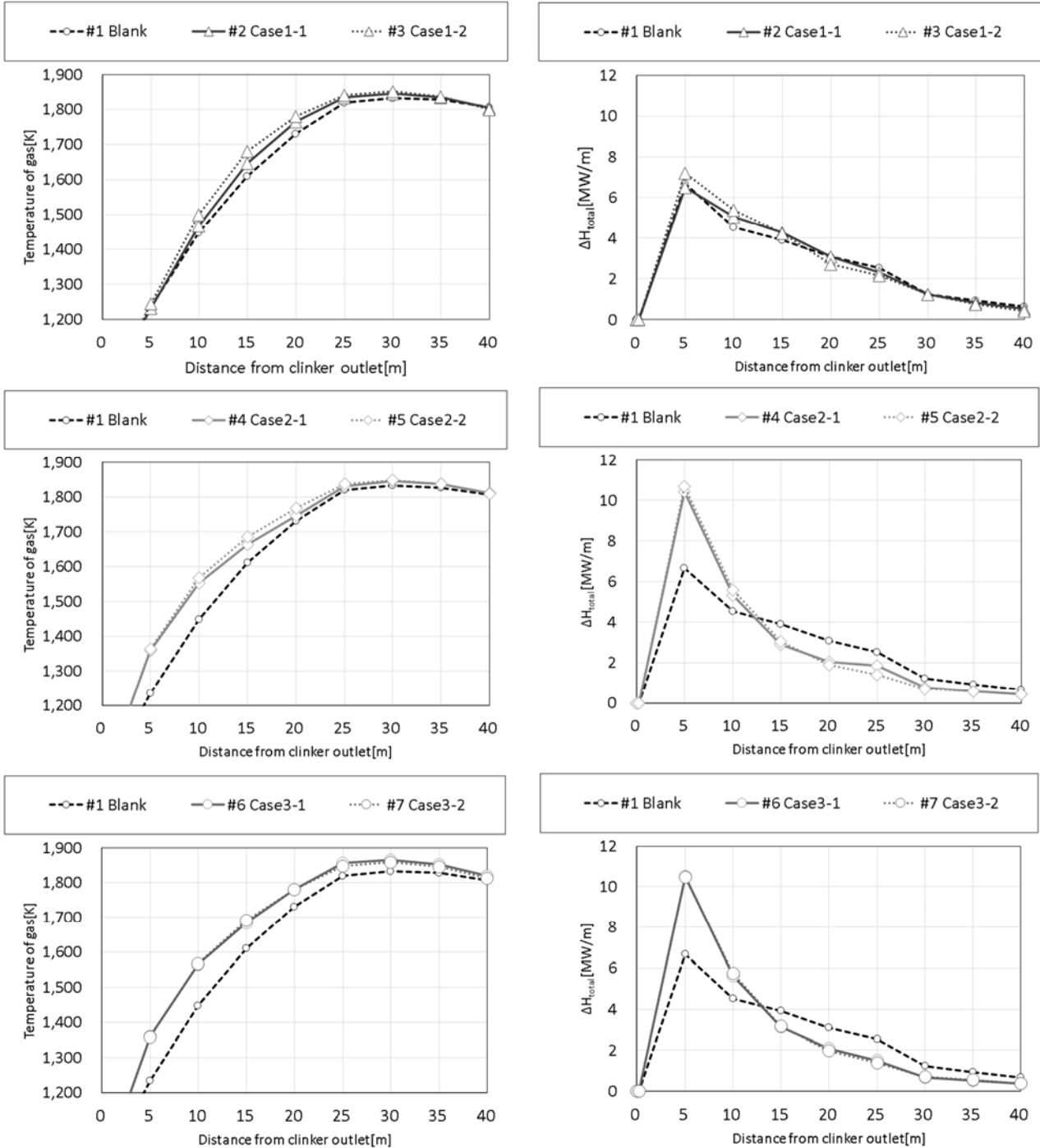


Fig. 9 Profile of gas temperature and heat generation
(ガス温度履歴と発熱履歴)

5. まとめ

本報告では、熱流体シミュレーションを用いてTMPバーナの運転条件が廃プラのキルン内落下率、およびキルン内燃焼挙動に及ぼす影響について評価し、廃プラの増量に有効なバーナの運転条件を検討した。得られた知見を以下に示す。

- キルン内の廃プラ落下率は、各空気ポートの風速や風量の増加により、いずれの水準でもブランクに対し減少した。また、廃プラ落下率は、一次空気の総モーメントを基準とした場合、旋回内流の改善が最も大きく、直進外流と旋回外流の改善は同程度であった。
- 旋回内流、旋回外流の風速や風量の増加は、バーナ半径方向の外側への燃料の拡散を大きくする効果があり、ブランクや直進外流の変更と比べて広範囲の酸素と接触できたため廃プラの落下率は減少したと考えられた。一方、発熱履歴やガス温度履歴はブランクと大きく異なり、極端な短炎化になると考えられた。
- 直進外流の風速や風量の増加により、乱流強度が増加する傾向が確認されたことから、火炎への二次空気の取り込み速度が増加したことで廃プラの落下率は減少したと考えられた。一方、発熱履歴やガス温度履歴はブランクとほぼ同じ傾向を示した。

以上のように、廃プラの落下抑制およびクリンカ焼成に最適な燃焼挙動を両立するバーナ運転条件は、直進外流の風速、または風量の増加と考えられる。両者の効果はほぼ同じであるものの、風量の増加はキルン内への大気の流れが多くなるため、燃費の観点から風速の増加の方が適していると考えられた。

6. おわりに

本検討結果をもとに、従来のTMPバーナを改造し、直進外流の高速化が可能な、新たなバーナを実機に導入した。今後は、実機において廃プラ増量条件でのキルン燃焼挙動やセメント品質へ及ぼす影響を評価していく。

参考文献

- 1) セメント協会. 廃棄物・副産物の有効利用. <http://www.jcassoc.or.jp/seisankankyo/seisan01/seisan01a.html> (accessed 2020-08-17)
- 2) 国内外で規制強まる, 中国輸出の先行き不透明, 国内循環に向けた備えを. 週刊循環経済新聞. 2018-01-22, p. 25.
- 3) 輸出規制強化, 樹脂安, コロナ, 廃プラスチックのリサイクル. 週刊循環経済新聞. 2020-08-03, p. 18.
- 4) 谷 光男, 伊東裕恭, 磯崎進市, 渡部雅之, 中山道夫. 石灰焼成炉におけるプラスチック燃料化技術. 無機マテリアル. 1999, 6(279), p. 130-135.
- 5) 浅沼 稔, 有山達郎, 山田 裕, 藤井益弘, 大河内巖, 炭竈隆志, 徳田昌則. 高炉における廃プラスチック利用技術. 日本エネルギー学会誌. 77(5). 1998, p. 423-431.
- 6) 太平洋エンジニアリング. 製品情報: 低NOxバーナー(TMPバーナー) <http://www.taiheiyo-eng.co.jp/cement/nox-tmp> (accessed 2020-08-17)
- 7) 太平洋セメント. 太平洋セメントCSRレポート 2007. 2007.
- 8) Mario Henrique Interlenghi; Carlos Roberto Moreira da Cunha. NOx reduction at Vidal Ramos. International Cement Review. 2014, 11, p. 78-82.
- 9) 王 俊 柱, 坂庭大輔, 高山佳典, 島 裕和. 廃プラスチック燃焼シミュレーション. 三菱マテリアル株式会社セメント研究所研究報告. 2013, 14, p. 17-23.
- 10) Ovidiu Marin; Olivier Charon; Jacques Dugue; Sarah Dukhan; Wei Zhou. Simulating the Impact of Oxygen Enrichment in a Cement Rotary Kiln Using Advanced Computational Methods. Combustion Science and Technology. 2001, 164(1), p. 193-207.
- 11) Renata Favalli; Luis Filipe Fabiani; Luiz Felipe de Pinho. Enhancing the Performance of Kiln Burners. World Cement. 2015, 46(11), p. 111-117.

- 12) 玉重宇幹, 青山久範. セメント製造における都市ごみ利用技術について—廃プラスチックのセメント焼成燃料化—. 粉体工学会誌. 2009, 46(6), p. 489-493.
- 13) 溝渕泰寛. 燃焼流れ. ながれ. 2019, 38(4), p. 306-309.
- 14) 浅井智広, 百々 聡, 苅宿充博, 八木宣夫, 穠山 恭大, 林 明典. 石炭ガス化複合発電向け多孔同軸噴流バーナを備えたドライ低NO_xガスタービン燃焼器の開発. 火力原子力発電大会論文集. 2014, 10, p. 88-94.
- 15) 仲町一郎, 徳本恒徳. 燃焼講座(II): 機体の燃焼. 1987, 66(3). p. 231-238.
- 16) 橋本 望, Hadi Bin Khalid, 市村 涼, 藤田 修. O₂/N₂雰囲気中における球状微粉炭火炎伝播速度に及ぼす乱流強度の影響に関する研究. 石炭科学会議発表論文集. 2017, 54, p. 68-69(No. 2-8).
- 17) 永野幸秀, 泊 圭一郎, 鶴留裕之, 津田晃弘, 北川 敏明. 高CO₂濃度雰囲気下における石炭ガス化ガスの乱流燃焼速度. 日本エネルギー学会大会講演要旨集. 2013, 22, p. 222-223(5-1-5).