

## セメント焼成用高効率低NO<sub>x</sub>バーナの開発

I C E T T - 明石町研究室(太平洋セメント株)

主任研究者 金子 行夫

研究員 中崎 雅文、龍 勝俊、進藤 拓也

鈴木 貴彦、内田 仁、輪達 仁司

内藤 浩一

開発期間 2002～2004年度

### 要約

環境汚染負荷物質である窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)の発生量を抑制できるセメント焼成用高効率低NO<sub>x</sub>キルンバーナの開発ならびにこの開発の支援技術であるセメントキルンバーナの燃焼シミュレーションによるNO<sub>x</sub>発生量解析技術の確立を目的に本開発に着手した。

シミュレーションによりNO<sub>x</sub>抑制性能を有すると確認されたバーナを実操業キルンに導入し、その操業データとシミュレーションを比較した結果、仮定したNO<sub>x</sub>抑制メカニズムの妥当性と仕様の異なるキルンでの実用性が確認された。しかしながらシミュレーションによるNO<sub>x</sub>発生量解析技術については未だ改善の余地がある。

### 1. 開発の目標

目標は高品質のセメント製造、可燃性廃棄物使用による化石燃料代替増量を可能にするセメント焼成用高効率低NO<sub>x</sub>バーナの開発および支援技術である熱流体シミュレーションでのNO<sub>x</sub>発生量解析技術の確立である。

本開発による最終的な数値目標は下記の通りである。

- ・ 化石燃料による熱量原単位低減 : 50kcal/kg-cem(約7%低減)
- ・ NO<sub>x</sub>発生量抑制 : 100ppm(O<sub>2</sub> : 10%換算)

### 2. 平成15年度実施内容及び結果

#### (1) NO<sub>x</sub>生成還元メカニズムと高効率低NO<sub>x</sub>バーナの基本概念

一般的なセメントキルンバーナは旋回と直進の空気流を保有しており、旋回流により内部循環を形成することで着火の安定性、保炎機能を確保し、直進流により高温の二次空気の誘引、揮発分の燃焼促進、内部循環の高温化、Volatile NO<sub>x</sub>の生成など主な燃焼性能を確保している。更に直進流を高速化した場合は高温の燃焼ガスを火炎内に取り込む再循環が起き、内部循環と交わる形でNO<sub>x</sub>還元領域が形成される。再循環がCharの燃焼を促進することで、火炎後方においてChar NO<sub>x</sub>、Thermal NO<sub>x</sub>が生成される。

そこで、このようなセメントキルンバーナの燃焼特性と一般に知られているNO<sub>x</sub>の生成特性

からセメントキルンにおけるNOx抑制のポイントは不必要に高い焼成温度の抑制と燃料と空気の混合状態の制御による還元領域の安定形成が重要な要素であると考え、フレーム内反応を仮説し高効率低NOxバーナ設計の基本コンセプトを以下の通り考案した。

高温の二次空気を火炎内に取り込み、フレーム内に吐出された燃料を急速に高温化することで揮発分の放出を促し、還元物質となる中間反応物の生成を促進する。

フレーム中心部へ供給される一次空気量を可能な限り減らし、還元物質をフレーム内に安定して発生させることで還元領域を継続して形成させる。

燃焼ガスの再循環を発生させ、フレーム後方で生成するNOx ( Char NOx、 Thermal NOx ) を還元領域に取り込む。

このような設計コンセプトに基づいたものが開発バーナ ( F、Hバーナ ) 形状であり、実機試験対象工場既存のBバーナおよびEバーナと比較して図1に示す。開発バーナの特徴としては、燃料流を挟む形で旋回流を設置し操作範囲を幅広くすることでフレ

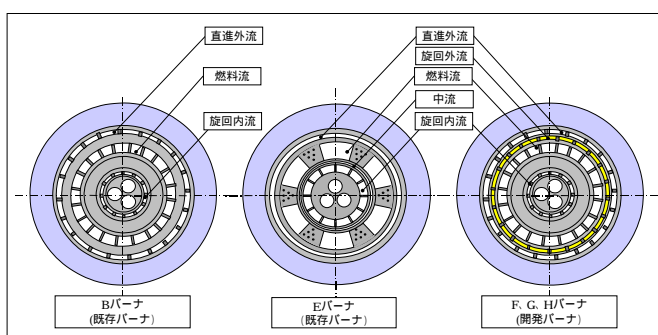


図1 . 既存バーナと開発バーナの先端構造比較

ーム中心における空気量および燃料と空気の混合状態を制御可能としていること、燃料の内側から拡散する旋回内流および燃料流を揮発分放出に最低限必要な風量まで減らす一方でモーメントを維持し、セメント焼成に必要な燃焼性能を維持できることが挙げられる。

## (2) Fバーナの実機導入とシミュレーション結果との整合性

表1にC-1キルンを対象としたFバーナの開発試験水準を既存のEバーナと比較して示す。Fバーナでは各一次空気流路ごとの風量バランスを調整し一次空気量を減らしながら燃焼性に必要なモーメントを確保できる設計とし、通常運転水準および一次空気量を可能な限り低減したNOx抑制重視水準を想定してシミュレーションを実施した。

表1 . Fバーナ開発試験水準

	クリンカ 生産量 t/d	燃料量 t/h	窯尻 O <sub>2</sub> %	一次空気			
				Ao 比 <sup>1</sup> %	モーメント <sup>2</sup>		
					旋回成分	直進成分	
N/MW							
E バーナ	3,000	9.0	5.0	21.0	2.5	8.0	
F バーナ	通常運転	3,000	9.0	5.0	12.0	1.6	6.4
	NOx 抑制水準	3,000	9.0	5.0	9.5	0.7	4.4

1 Ao比; 対理論燃焼空気一次空気比率、 2 各空気流の運動量 (風量×速度) / バーナ供給燃料の発熱量

シミュレーションの結果として、図2に揮発性成分（VM）の濃度分布を、図3にガス温度のプロファイルを示す。図2より、Eバーナにおいてはフレーム内に揮発性成分はほとんど見られないが、Fバーナでは両水準ともにその分布が明瞭になっており、燃料の急速昇温とフレーム内拡散の調整によりHCNのような還元物質によるNOx還元領域がフレーム内に形成されていることがわかる。図3を見るとFバーナの通常運転水準においてはEバーナ同様に、クリンカ焼成に必要な最高温度を維持しNOxの発生源となる局所的なヒートスポットも存在しないことが確認されるが、NOx抑制重視水準では還元領域形成を重視し一次空気量を減らし過ぎる余り、燃烧領域がキレン奥へと移動しフレーム後

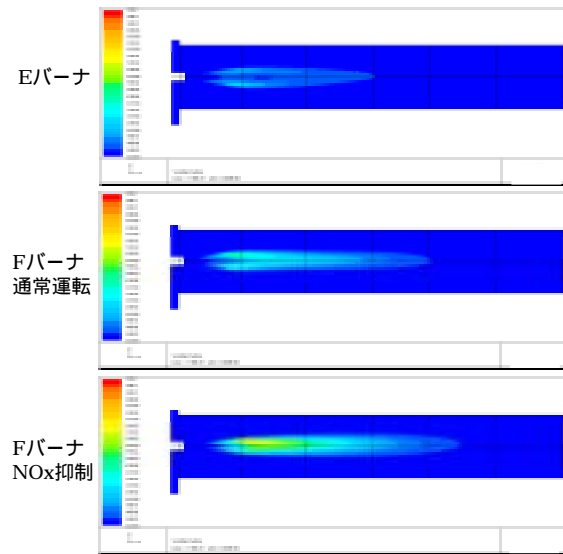


図2．揮発性成分（VM）の濃度分布

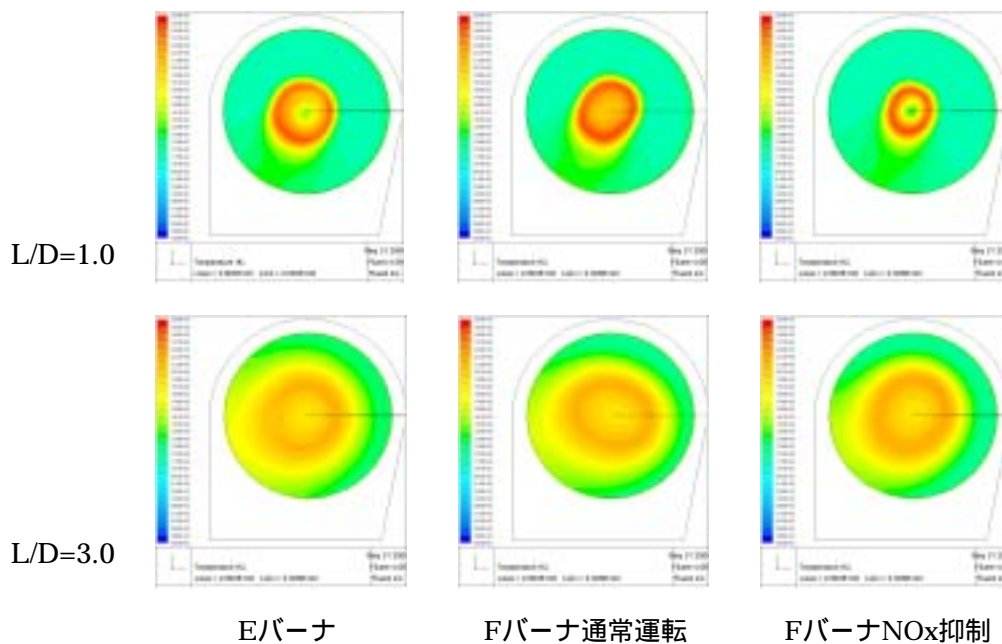
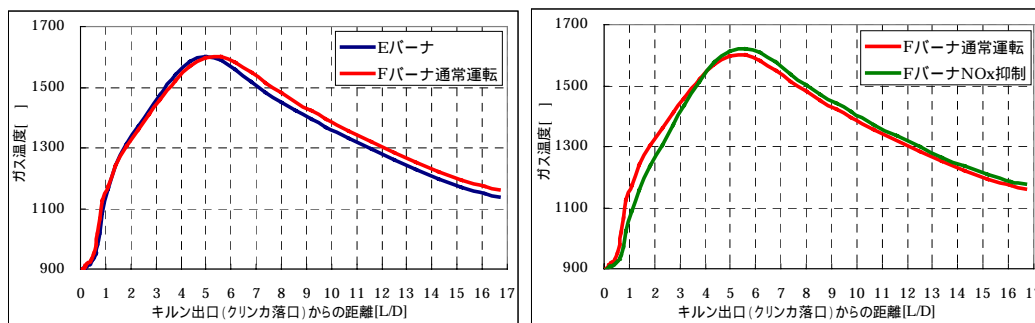


図3．ガス温度のプロファイル（E、Fバーナ）

方の温度上昇を招いており、一次空気量の低減は諸刃の操作であると言える。

これらの結果として得られる断面平均NOx濃度のプロファイルを図4に示す。Fバーナは通常運転水準においてはNOx発生が抑制されるが、NOx抑制重視水準ではフレーム中心部(L/D=1~4)でのNOx抑制とフレーム後方(L/D=4~7)でのNOx増加により、最終的なNOx発生量はEバーナとほぼ同等になるというシミュレーション結果となっている。

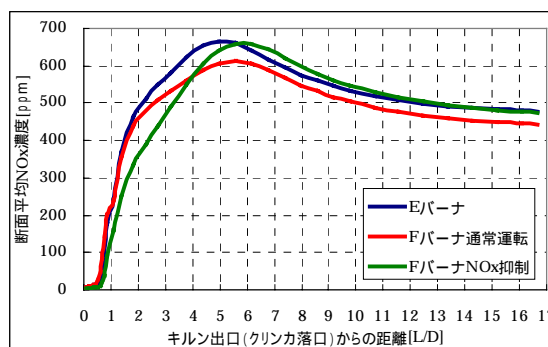


図4．断面平均NOx濃度のプロファイル

このようなシミュレーション結果を踏まえて、FバーナをC-1キルンに導入し実機でのバーナの性能とシミュレーションの正確性を確認した。表2にFバーナ実機試験での窯尻NOx濃度をシミュレーション結果と比較して示す。Fバーナによる運転はクリンカ品質を満足し燃焼性については問題なく、通常運転水準で約100ppm、NOx抑制水準では約250ppmのNOxが抑制された。またNOx抑制により煙突排ガス中のNOx濃度を規制値以下に制御している脱硝剤の使用量も減少しており、FバーナはNOx抑制性能を有していると言える。但し、通常運転水準での結果はシミュレーションと類似しているが、NOx抑制水準での結果は相反するものとなっている。この相違に関して、シミュレーション結果と実機試験の整合性は以下のように考察される。

シミュレーションでのNOx濃度が実機に比べて低いのは、焼成中のクリンカからの熱輻射が考慮されておらず実機の場合よりガス温度が低いためである。

NOx抑制水準においてはフレーム後方(焼成奥)の温度上昇によりNOx発生量が増加するシミュレーション結果となっているが、実機においては焼成温度を下げたことでNOx発生量が抑制されている。これはフレームの長炎化により焼成帯奥から原料温度が上昇し、高温保持時間(クリンカ焼成時間)が延びることでクリンカ品質が向上するため、同品質のクリンカとなるように焼成温度を下げる操作を実施したためである。

以上のように、現段階ではNOx抑制のための各要素のみシミュレーションが可能であるが、NOx発生量の正確な傾向および絶対値を予測するためには焼成中クリンカの熱輻射およびクリンカ熱履歴の変化の影響を反映させる必要があり、今後その検討に入る予定である。

表2．窯尻NOx濃度のシミュレーションと実機試験結果の比較(Fバーナ)

	シミュレーション		実機		脱硝剤 原単位
	Ppm	増減	ppm	増減	
Eバーナ	625		1,026		100
Fバーナ	通常運転	585	920		35
	NOx抑制重視	630	760		20

(3) 仕様の異なるキルンでの実機試験

本開発によるバーナを国内外のセメントキルンにおいて広く実用化するためには、多種多様なキルンでのシミュレーション、実機試験の実績が必要であるため、仕様の異なるキルンとして St-6 キルンを対象としたシミュレーションおよび実機試験を行いその実用性を確認した。

表3に St-6 キルンを対象とした H バーナの開発試験水準を既設 B バーナと比較して示す。F バーナでの実機試験結果からフレーム中心部へ供給される一次空気量を低減することは NOx 抑制に効果的であったため、H バーナはこの結果を踏まえた設計とした。すなわち、F バーナの NOx 抑制水準に相当する一次空気量を通常運転水準とし、更に一次空気量を低減した場合を NOx 抑制重視水準としてシミュレーションを実施した。

表3 . Hバーナ開発試験水準

	クリンカ 生産量 t/d	燃料量 t/h	窯尻 O <sub>2</sub> %	一次空気			
				Ao 比 <sup>1</sup> %	モーメントム <sup>2</sup>		
					旋回成分 N/MW	直進成分 N/MW	
B バーナ	4,000	9.0	3.0	19.0	1.7	8.0	
H バーナ	通常運転	4,000	9.0	3.0	9.0	1.0	5.1
	NOx 抑制水準	4,000	9.0	3.0	7.5	0.7	4.1

1 Ao比；対理論燃焼空気一次空気比率、 2 各空気流の運動量（風量×速度）/バーナ供給燃料の発熱量

H バーナも F バーナ同様にフレーム内還元領域が形成されていることは別途シミュレーションで確認している。図5にガス温度プロファイルを示す。前述したとおり、現段階のシミュレーションはクリンカの熱輻射による相互作用を反映していないため、その影響を予測してガス温度

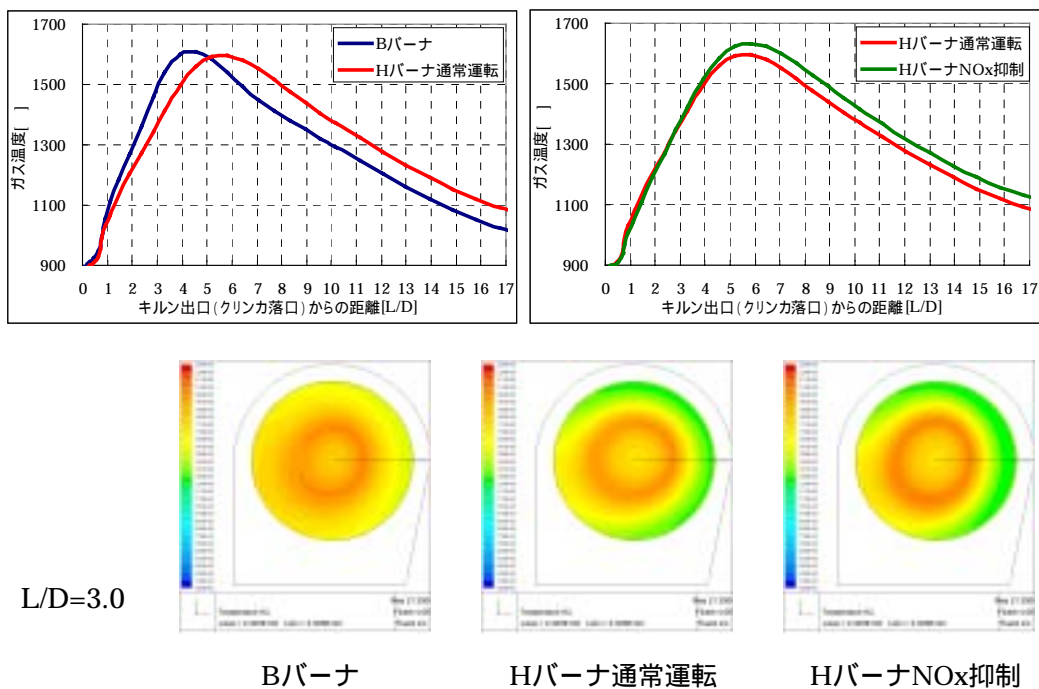


図5 . ガス温度プロファイル (B、Hバーナ)

を評価する。図5を見るとHバーナの通常運転水準においてはFバーナのNOx抑制水準同様にクリンカ熱履歴が変化すると考えられるため、実機においては焼成温度の下げ操作が可能であると考えられる。またBバーナに比べてフレーム径方向の不必要な広がりや抑制されNOxの発生源となる局所的なヒートスポットも存在しないことから、Fバーナ同様良好な燃焼性を維持しながら還元領域の安定形成と焼成温度の最適化によるNOx抑制効果を有すると期待される。NOx抑制重視水準も同様であり、焼成温度の調整と均一な温度分布から同様の効果が期待される。

このようなシミュレーション結果を踏まえてHバーナをSt-6キルンに導入し、実機でのバーナの性能を確認した。表4にHバーナ実機試験での窯尻NOx濃度をシミュレーション結果と比較して示す。Hバーナによる運転はクリンカ品質を満足し燃焼性については問題なく、通常運転水準で約200ppm、NOx抑制水準では約300ppmのNOxが抑制された。またNOx抑制により煙突排ガス中のNOx濃度を規制値以下に制御している脱硝剤の使用量も減少しており、HバーナはNOx抑制性能を有していると言える。したがって開発バーナはキルン様式が異なっても運転に沿った設計とすることで燃焼性能、NOx抑制性能を発揮できるバーナであると言える。

表4．窯尻NOx濃度の実機試験結果とシミュレーションとの比較（Hバーナ）

		シミュレーション		実機		脱硝剤 原単位
		Ppm	増減	ppm	増減	
Bバーナ		286		1,031		100
Hバーナ	通常運転	214		823		50
	NOx抑制重視	282		752		20

#### （4）可燃性廃棄物の活用状況

我々は本開発によるバーナを導入する目的としてNOx抑制以外にも可燃性廃棄物の利用拡大による化石燃料の使用削減を挙げている。実際にこのバーナを導入した工場では可燃性廃棄物使用割合を約2~5%増加することが可能となっており、同熱量相当の化石燃料を代替している。また複合効果としてNOx抑制による脱硝剤削減ならびに一次空気量低減によるキルン効率向上により約10kcal/kg-cemの焼成熱量を低減することも可能になっている。

### 3．結論

- ・ 本開発によるバーナはセメント焼成を対象とした高効率低NOxバーナであると言える。
- ・ 性能として約100~300ppmのNOx抑制効果、約2~5%の化石燃料代替効果が得られた。

### 4．今後の予定

バーナ設計最適化の支援技術であるNOx発生量解析シミュレーション技術については未だ十分な段階には達しておらず、NOx発生量の正確な傾向および絶対値を予測できていない。次年度は焼成中クリンカモデルについて検討するとともに、現段階で使用可能なNOx抑制のための要素シミュレーションを活用して更なるバーナ形状の最適化を進める。