



コークス炉の低NO_x型燃焼構造の開発

吉田 周平*・高瀬 省二*²・内田 誠*³・佐地 孝文*³・小山 博之*³・山本 雅章*⁴

Development of Low NO_x Combustion Structure in Coke Oven

Shuhei YOSHIDA, Shoji TAKASE, Makoto UCHIDA, Takafumi SAJI, Hiroyuki KOYAMA and Masaaki YAMAMOTO

Synopsis : One of the targets of the SCOPE21 process was to improve the productivity. To achieve high productivity, the process was applied the following items; (1) ultra super dense brick, (2) thin wall (70 mm), (3) hot coal charging, (4) medium temperature carbonization. As the heat flux for carbonization was needed about 2 times as much as a conventional coke oven, the combustion technologies to achieve high productivity were investigated by using the actual scale combustion test oven. The combustion conditions to achieve low NO_x in the waste gas and uniform heating for carbonization were clarified. The coke oven of the pilot plant was designed based on these results. The combustion targets of the low NO_x and uniform heating were achieved in the test operation.

Key words: SCOPE21; coke oven; uniform heating; NO_x; combustion chamber.

1. 緒言

国家プロジェクトとして開発が進められた次世代コークス製造技術 (SCOPE21 プロセス^{1,2)}, 以下SCOPE21と略記) は, 既設プロセスである湿炭装入法と比較して生産性を3倍に高めることを開発目標に挙げている。この目標達成のために, 炭化室壁煉瓦として壁厚70mmの超高密度珪石煉瓦を採用したコークス炉において350°C程度にまで高温予熱された石炭を800°C程度の中低温で窯出し約7時間程度という極めて短時間で乾留することが必要である。この乾留時間短縮のためには炭化室壁からの石炭への単位時間当たりの伝熱量を約2倍に増加させる必要がある。単位時間当たりの伝熱量を2倍に増加させることは燃焼室での単位時間当たりの燃料ガス量を2倍に増加させることに相当する。一般に燃料ガス量を増加させると局部燃焼が顕著となり, 高さ方向の均一加熱が達成できないだけでなく, 燃焼排ガス中のNO_x濃度も上昇し, 環境上好ましくない。したがって, SCOPE21の開発目標達成には既設炉より燃料ガス量を2倍の条件下でも均一加熱, 低NO_x燃焼が可能な新たな燃焼構造を開発する必要がある。

本稿では, まず各種燃焼条件の検討が可能な実機大の燃焼試験炉を製作して, 目標とする均一加熱や低NO_x燃焼条件を探索した結果を報告する。さらに燃焼試験炉結果をもとに設計したパイロットプラント (以下PPと略記) 炉の燃焼構造評価を行った結果について以下に報告する。

2. 実機大燃焼炉試験

高生産性の燃焼構造開発の具体的取組みとして, 下記の二つの目標値を設定し検討を実施した。

- ①均一加熱: 高さ方向の温度差50°C以下 (コークス押出時の炉蓋近傍温度700°C以上)
- ②NO_x濃度: 100 ppm以下 (at炉温1250°C)

ここで均一加熱として50°C以下を設定したが, これは中低温の800°C程度で窯出する時点で高さ方向の炭層中心部温度 (以下, 炭中温度と称す) が±25°Cを想定したものである。既設炉の場合, >100°C³⁾であり, 今回の目標は極めて均一化を指向したものである。また, NO_x濃度も現状の新設炉建設の規制値が<170 ppmであり, 更に今後の環境規制強化を勘案し大幅にNO_x濃度を低減させた目標とした。

これらの目標を達成するコークス炉の燃焼構造検討には実機大の燃焼試験炉 (以下燃焼試験炉と称す) を用いた検討が不可欠である。このため, 本検討では次世代の実機コークス炉として国内最大級の炉高7.5mを想定した燃焼試験炉を製作し, 炉底ポート形状, 高さ方向のエア分配などの影響を調査した。

2.1 実験方法

2.1.1 実験装置

(1) 燃焼方式

Fig. 1に実験に用いた燃焼試験炉の概略図およびTable 1

平成16年1月8日受付 平成16年4月26日受理 (Received on Jan. 8, 2004; Accepted on Apr. 26, 2004)

* 住友金属工業 (株) 総合技術研究所 (Corporate Research & Development Lab., Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16-1 Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki-ken 314-0255)

* 2 住友金属工業 (株) 本社 (Head Office, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

* 3 住友金属工業 (株) 鋼板・建材カンパニー (Steel Sheet, Plate, Titanium & Structural Steel Company, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

* 4 (社) 日本鉄鋼連盟 開発統括部 (現: JFE スチール (株) 西日本製鉄所) (SCOPE21 R&D Department, The Japan Iron and Steel Federation, now East Japan Works, JFE Steel Corp.)

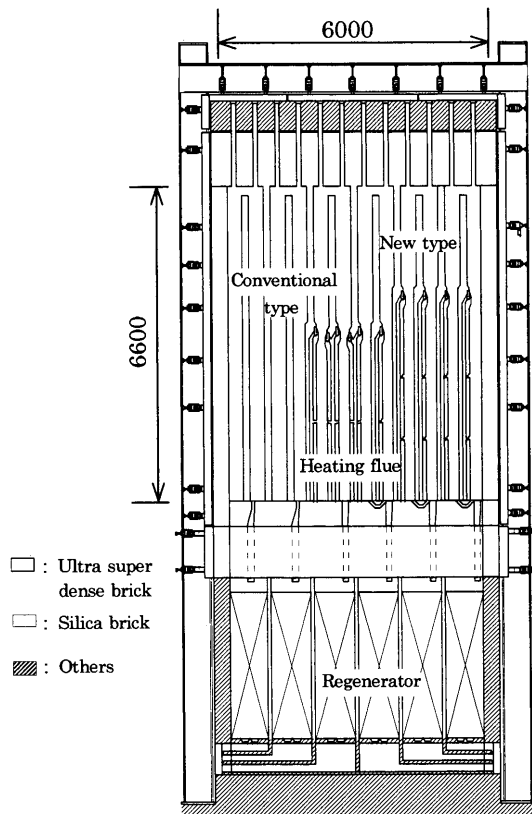


Fig. 1. Outline of the combustion test oven.

Table 1. Specifications of the combustion test oven.

Oven size		Height 7.5m Length 6m	
Combustion chamber (Flue)	Gas inlet	1 stage	MG ^{a)} / COG ^{b)}
	Air inlet	3(4) stages	
Gas calorific value	MG	1100kcal/Nm ³	
	COG	4600kcal/Nm ³	

(Note) a):Mixed gas b):Coke oven gas

にその主仕様を示す。

- ① 燃焼室数：12 燃焼室（フリュー）とし、既設炉タイプの燃焼構造6フリュー、新たに開発対象とした燃焼構造6フリューに大きく分けられる。
 - ② 燃焼構造：いずれの燃焼構造でも燃料ガスは炉底部からの1段とし、エアは開発構造では高さ方向に3段、あるいは4段で吐出させた構造である。エアは強制通風方式とし、炉底部からのエアと2段目以降のエアとは独立で制御できる構造とした。また排ガス循環効果も検討可能なように燃焼室下部にサーキュレーション孔を2ヶ所設置した。後述する炉底ポートの形状変更は、矩形の燃料ガスポートとエアポートを平行に配置し、ポート上にポート開度調整のレンガを乗せ、燃料ガスポートとエアポートの配置状態が完全な平行配置から千鳥配置までレンガを移動し調整可能とした。
- (2) 燃焼室壁煉瓦構造
炭化室に相当する壁煉瓦は開発構造部では70mmの薄壁

Table 2. Specification of ultra super dense brick.

Apparent specific gravity (-)	2.28
Porosity (%)	13.1
Compressive strength (MPa)	124
Thermal conductivity ^{a)} (W/(m·K))	2.94

(Note) a):at 1073K

Table 3. Test items on the combustion test oven.

Gas temperature ^{a)}	} 0.8, 2.8, 4.1, 4.8, 6.2m from O.S. ^{c)}
Wall temperature ^{b)}	
NOx content	} 2.8m from O.S. ^{c)} in waste gas zone
O ₂ content	
Circulation ratio	Measurement:He tracer
Heat flux	Calculated by water volume and difference temperature of water

(Note) a):Continuous measurement

b):15mm from wall surface

c):Oven sole

とし、Table 2に示すような超高密度珪石煉瓦を使用して伝熱量が既設炉の2倍になるような対応をした。

(3) 抜熱量調整

燃焼室煉瓦の外側には銅製の水冷抜熱板を設置し、断熱材の厚みを調整して所定の抜熱量が得られるようにした。

2.1.2 計測項目および計測方法

炭化室がないため計測は燃焼室内の温度、NOx濃度を主体に計測した。Table 3に計測項目をまとめて示す。温度計測は燃焼室内の雰囲気温度に加え煉瓦表面から15mm内側に熱電対を埋め込み煉瓦内温度の計測も実施し、2点間の温度差から壁表面温度を直線回帰で算出した。また、温度計測は燃焼中と排気中のそれぞれの期間で連続測定し、特に記載が無い場合は燃焼・排気の平均値で表記した。NOx濃度は排気側燃焼室で連続測定し、排気中の平均濃度で表記した。水冷抜熱板への伝熱量は水量と入出の温度差から算出した。

なお、サーキュレーション率は燃焼排ガスが炉底部に設置したサーキュレーション孔から燃焼側に循環する比率である。

2.2 結果および考察

各種計測は3段燃焼と4段燃焼ともに実施したが、後述するように3段燃焼の構造で開発目標とした均一加熱・低NOx燃焼が達成できたため、ここでは3段燃焼の結果を以下に記す。また燃料ガスとしてはMixガス（MG：高炉ガスとコークス炉ガスを混合したもの）を使用した場合で種々の調査を実施し、PP試験に用いる乾留炉の設計条件を提示した。

2.2.1 炉底部ポート形状変更の影響

前記した炉底部ポートの形状を種々変更して高さ方向の温度分布およびNOx濃度を測定した。Fig. 2に代表的なポート形状を示す。タイプ(a)のポートは燃料ガスポートとエアポートが直線的に配置させた構造で、タイプ(b)は燃料ガスポートとエアポートを千鳥型に配置した構造であ

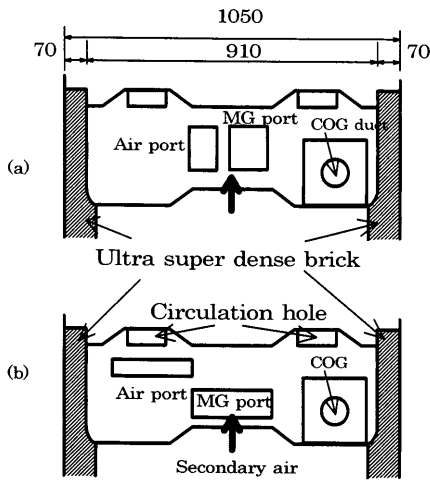


Fig. 2. Outline of the port arrangements in the bottom of flue.

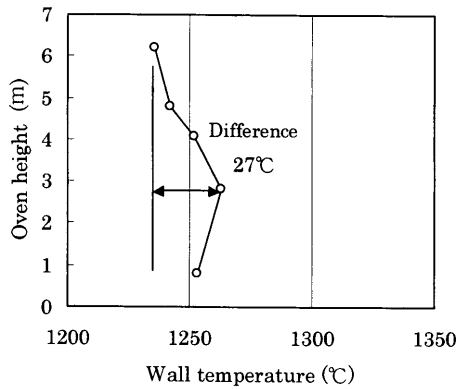


Fig. 3. Wall temperature distribution in the direction of oven height in the combustion test oven (fuel gas: MG).

る。タイプ(a)では燃料ガスとエアが対峙するように配置されているため、この狭い境界面(燃料ガスとエアの接触面)で局部燃焼しNOx濃度が268ppmと高く目標が達成できないことが判明した。一方、タイプ(b)では千鳥型に配置した構造であるため、燃料ガスとエアの接触が抑制され、炉下部で両者が十分混合しない状態で上昇する。このため、局部燃焼が抑制され、NOx濃度は100ppmと目標値レベルに達することが判明した。

以上のように、エア3段による多段燃焼でも炉底ポート形状によって燃焼状況が大きく異なることが明らかとなった。この結果から、以降の試験ではタイプ(b)の千鳥配置構造のポートで均一加熱や低NOx燃焼の評価試験を実施した。

(1) 均一加熱評価

Fig. 3に炉温(燃焼室壁表面温度に相当)が1250°Cにおける高さ方向の温度分布の一例を示す。これは炉底部・2段目・3段目のエア分配をそれぞれ40:22:38に設定した場合である。高さ方向の温度差は27°Cであり、目標とした50°C以下は十分に達成された。高さ方向のエア分配は

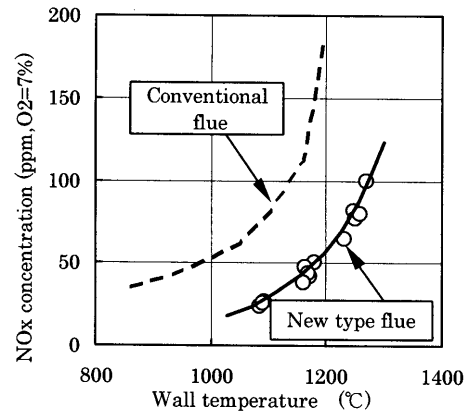


Fig. 4. Relationship between wall temperature and NOx concentration in exhaust gas in the combustion test oven (fuel gas: MG).

Table 4. Test results in the case of COG.

	Air volume on 2nd duct	
	11%	3.5%
Temperature difference (°C)	123	61
NOx concentration (ppm, O2=7%)	143	98

燃焼状況に大きく影響し、炉底部からのエア量を抑えることで炉下部での局部燃焼が抑制される。さらに炉底ポートを千鳥状に配置させているため燃料ガスとエアの接触が抑制され、炉底部での混合が抑制され局部燃焼が回避されたと考えられる。また、この条件下では排ガスサーキュレーション率は13%で緩慢燃焼に寄与したと考えられる。

(2) NOx濃度評価

Fig. 4に示すように燃焼室壁温度によって変化し壁温度1250°Cでは75ppm(酸素濃度7%換算値)と極めて低い結果となった。これは炉下部での局部燃焼が抑制された効果である。

なお、コークス炉ガス(COG)燃焼では2段目エア吐出口付近で局部燃焼が認められ、2段目からのエア量を抑制すればTable 4に示すように均一加熱や低NOx燃焼が可能であることが明らかとなった。

2.2.2 投入ガス量の影響

炉温1250°C時の燃料ガス投入量を100%とし燃料ガス量を85%と70%に低下させた。この時の炉温はそれぞれ1177°Cと1082°Cであった。高さ方向の温度分布をFig.5に示すが、燃料ガス量を70%に低下させた炉温1082°Cの条件でも高さ方向の温度差は37°Cと目標とした50°C以下は十分達成されていた。このように燃料ガス量を低下させても均一加熱が維持されたのは、燃料ガス量を低下させても1段目から3段目までのエア量の分配は変わらず緩慢燃焼に適していたためと考えられる。

これらの結果から、本開発の燃焼構造は均一加熱と低NOx燃焼が確保され、生産変動対応性にも優れた構造であると判断され、PP試験に用いる乾留炉の設計に推奨で

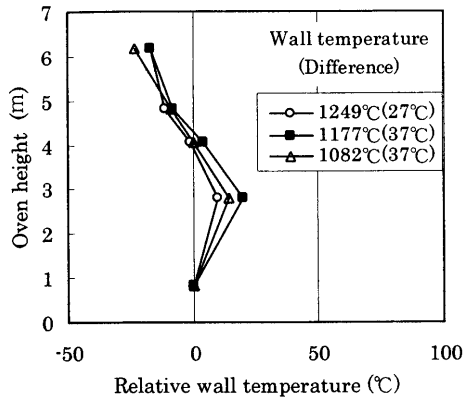


Fig. 5. Wall temperature distribution in the direction of oven height in the combustion test oven (fuel gas: MG).

きると評価された。

3. パイロットプラント (PP) 試験

PP 乾留炉の設計にあたって前記した燃焼試験炉の結果から均一加熱、低NOx燃焼を達成する燃焼構造として下記の2点を基本設計条件とした。

① 炉底部の燃料ガスとエアのポート配置を千鳥型構造とする。

② 燃焼段数は、目標の均一加熱・低NOx燃焼が達せられた3段燃焼方式とする。以下に具体的なPP試験方法を記す。

3.1 実験方法

3.1.1 実験装置

(1) 乾留炉基本構造

PP試験に用いた乾留炉の主仕様をTable 5に示す。炭化室は炉長が実機の1/2の大きさ以外は実機相当の規模の試験設備である。燃焼室の標準寸法は内壁間が910mm(冷間寸法)と燃焼試験炉と同寸法で構造もほぼ同一である。炭化室壁煉瓦は燃焼試験炉と同一の厚さ70mmの超高密度珪石煉瓦を使用した。

(2) 計測口配置

Fig. 6に示すように乾留炉は装入口が1ヶ所、計測口が3ヶ所あり、次項で示す計測が可能な設備となっている。

3.1.2 PP試験時期と計測項目および方法

(1) PP試験スケジュール

PP試験は約1年間実施したが、Fig. 7に示すように試験内容が大きく別けて3つに分類される。試験操業開始直後は立上操業期間として主に燃焼調整を中心に実施した。その後炉温1100°C前後で操業した第一次操業(低稼働率)試験を経て、最終目標とした炉温1250°Cの第二次操業(高稼働率)試験を実施した。試験期間中は燃料ガスとしてMG燃焼を主体に実施し、COG燃焼は短時間で燃焼状況の調査のみを実施した。

Table 5. Specification of the PP test oven.

Oven size		Height 7.5m Length 8m Width 0.45m	} 1 chamber
Combustion chamber (Flue)	Gas inlet	1 stage	
	Air inlet	3 stages	0, 1.66, 3.5m from O.S. ^{c)}
Gas calorific value	MG	1100kcal/Nm ³	
	COG	4100~4400kcal/Nm ³	

(Note) a): Mixed gas b): Coke oven gas c): Oven sole

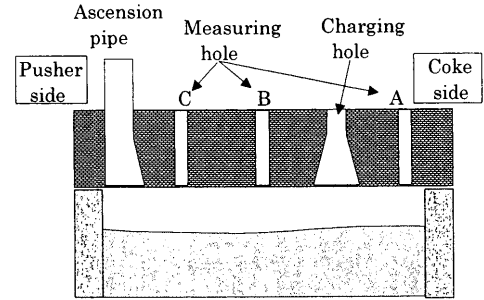


Fig. 6. Arrangement of measuring holes in top of the PP test oven.

Item	2001	2002	2003
Construction	→		
Heating up		←	
Test	Start up	4 months ↔	
	1st step	2.3 months ↔	
	2nd step	5 months ↔	

Fig. 7. Test schedule in the PP test oven.

Table 6. Test items on the PP test oven.

Gas temperature	} 11 flue
Wall temperature ^{a)}	
Tar-seam temperature	measuring hole A, B, C (mainly C)
NOx content	} 11 flue
O ₂ content	

(Note) a): 15mm from wall surface
b): Oven sole

(2) 調査項目および方法

調査項目をTable 6にまとめて示す。PP試験では石炭の乾留を伴った試験であるため、燃焼試験炉と同様な項目に加え、新たに炭中温度の計測を実施した。炭中温度計測はFig. 6に示した計測口C(11フレューに相当)を炭化室の代表として考え、必要に応じて計測口A・Bについても計測を実施した。高さ方向では1.19m, 3m, 6mの3ヶ所で計測し、6m位置は計測口Cから挿入し1.19m, 3m位置は押出機側(PS)の炉蓋から挿入して計測した。さらに炉内全体の均一加熱評価のためにPS炉蓋近傍の温度も同じ高さで計測した。

温度計測は1分ピッチで燃焼・排気とも連続測定し、特に記載がない場合はその平均値で表記した。NOx濃度については排気中の燃焼室で2~3分ピッチで測定し、その

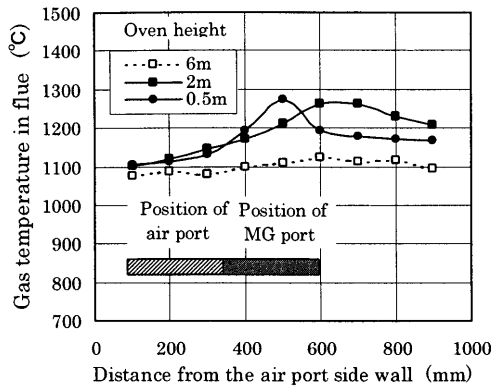


Fig. 8. Gas temperature distribution in the flue of the PP test oven (fuel gas: MG).

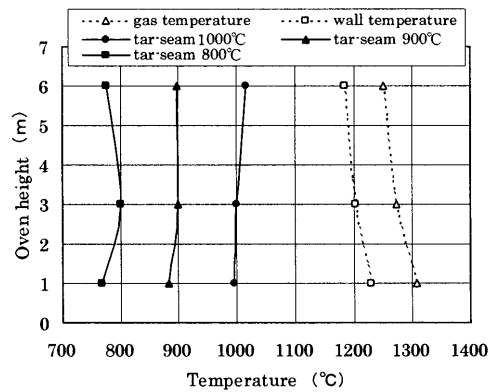


Fig. 10. Distribution of flue and tar-seam temperature in the direction of oven height in the case of 2nd step operation of the PP test oven (fuel gas: MG).

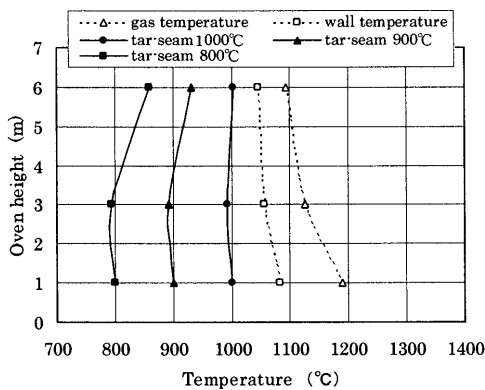


Fig. 9. Distribution of flue and tar-seam temperature in the direction of oven height in the case of 1st step operation of the PP test oven (fuel gas: MG).

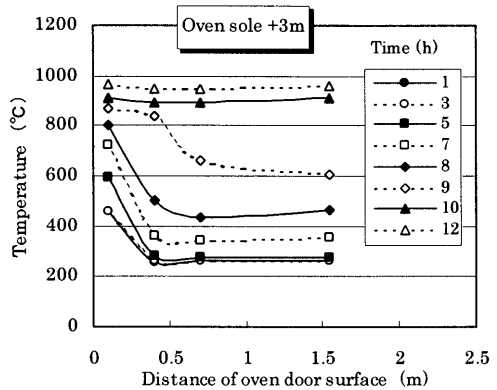


Fig. 11. Tar-seam temperature in the neighborhood of oven door of the PP test oven.

平均値で表記した。

3・2 結果および考察

3・2・1 均一加熱評価

(1) 高さ方向の温度分布

Fig. 8に第一次操業時の燃焼室断面方向の雰囲気温度を示すが、高さ方向1m付近でやや温度が高い部分が認められるものの2段目エア吐出位置より上の2m付近では均一化している。Fig. 9に示す炭中温度も含めた燃焼室温度の測定結果では、燃焼室の雰囲気温度は高さ方向で約100°Cの温度差が認められるが、壁表面温度では36°Cと目標とした50°C以内であった。炭中温度では1000°C到達時点で温度差は約10°Cとこれまでにない均一加熱を達成した。

また炉温が高い第二次操業では、Fig.10に示すように燃焼室温度および炭中温度ともに均一加熱を達成した。特にFig.10から明らかなように生産性向上を目的とした中低温窯出に相当する炭中800°C到達時点でも50°C以下の目標は達成した。このように千鳥型燃焼ポート構造が均一加熱に対して極めて有効であることを確認した。

なお、高さ方向のエア分配は炉底部からのエア量が全体の70%と極めて多いことが確認されたが、炉底部からのエア量増加によってサーキュレーション率が燃焼試験炉の

約2倍の28%と多くなったため均一加熱が達成されたと考えられる。

(2) 炉蓋近傍温度

一般に炉蓋近傍温度は乾留遅れが顕著であるが、Fig.11に示すようにPP試験においては乾留の遅れはなく、均一加熱が達成されていることを確認した。当初、炉蓋近傍温度は押出時で700°C以上を確保することを目標としていたが、炭中温度を計測した11フリューが1000°C到達時点では既に1000°C以上を示し、中低温窯出を想定した800°C到達時点でも700°C以上に到達している。このように炉蓋近傍温度の昇温が早い理由は、炉蓋のプラグ厚みを既設炉よりも炭化室側に30mm厚くした効果と考えられる。

以上の結果から、3段燃焼でも炉底ポートを千鳥型燃焼構造にすること、および炉蓋プラグ厚みを適正に設計することによって炉内の均一加熱は達成でき中低温窯出は均一加熱の面からは可能と判断された。

3・2・2 NOx評価

炉温を変更させた場合のNOx濃度を燃焼試験炉の結果と併せてFig.12に示す。PP試験時においてもNOx濃度は燃焼試験炉と同等の値を示し、目標とした炉温1250°Cで100ppm以下の低NOx燃焼が可能であることを確認した。

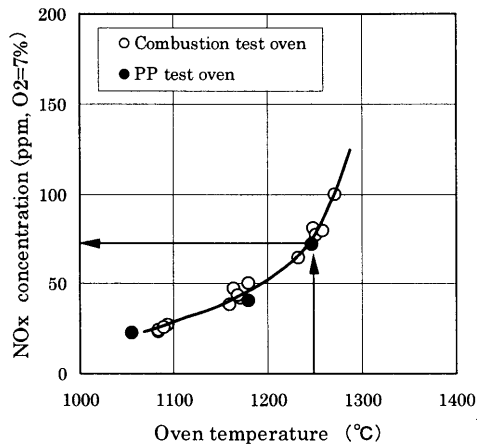


Fig. 12. Relationship between oven temperature and NOx concentration in exhaust gas (fuel gas: MG).

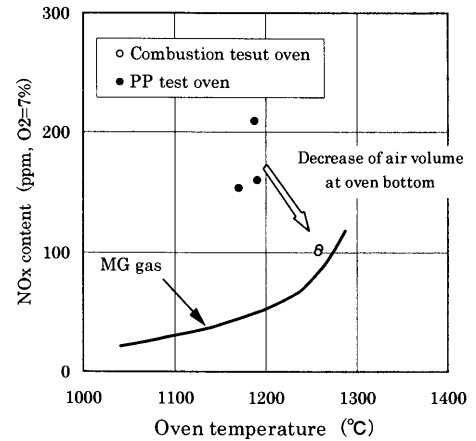


Fig. 15. Relationship between oven temperature and NOx concentration in exhaust gas (fuel gas: COG).

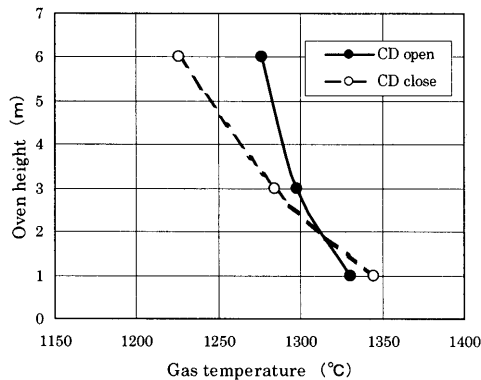


Fig. 13. Gas temperature distribution in the direction of oven height (fuel gas: COG).

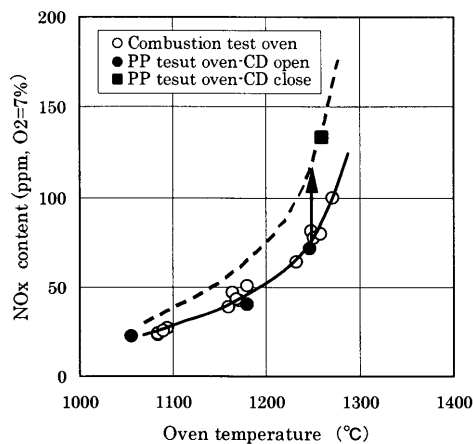


Fig. 14. Influence of circulation dumper on NOx concentration in the PP test oven (fuel gas: MG).

これは前記したように、PP試験においても燃焼試験炉と同様に局部加熱がない均一加熱が達成されたことによるものである。

3.2.3 サークュレーション効果

前記したようにサーキュレーション率は28%と多い結果であったが、その効果を明らかにするために炉温1250°Cの条件でサーキュレーション率0% (サーキュレー

ションダンパー (CDと略記) 全閉) の試験を実施した。温度計測結果をFig.13に、またNOx濃度変化をFig.14にそれぞれ示す。サーキュレーション率0%では燃焼室内の雰囲気温度差が54°Cから118°Cへと2倍以上に拡大し、またNOx濃度も75ppmから125ppmへと約70%上昇することが判明した。したがって、開発目標が達成のためには排ガス循環は必要と判断された。

3.2.4 COG燃焼時の評価

COG燃焼に変更した場合、炉底部からのエア量が全エア量の約88% (MGポートからもエアが吐出) を占めることに加え、排ガス中の酸素濃度がMG燃焼時と比較して高い (酸素濃度: 8~10%) ため、炉下部で局部加熱が発生しFig.15に示すようにNOx濃度はMG燃焼時と比較して高くなる。したがって、炉下部でのエア量を低下させ、2.3段目のエア量を調整すればTable 3に示した燃焼試験炉に近い均一加熱や低NOx燃焼が得られると推察される。

4. 結言

SCOPE21の開発目標の一つである高生産性を達成するための燃焼構造について検討した結果、以下のことが判明した。

(1) 実機大の燃焼試験炉で炉底ポート形状について検討を行い、MG燃焼では3段燃焼方式で、燃料ガスポートとエアポートを千鳥型配置にすることで目標とした均一加熱・低NOx燃焼が得られた。COG燃焼では2段目のエア量を抑制することで目標に近い燃焼状況が得られた。

これらの結果はパイロットプラントの乾留炉設計に反映させた。

(2) パイロットプラント試験では、MG燃焼は燃焼試験炉と同様に均一加熱・低NOx燃焼が可能で、3段燃焼で炉底ポート構造を千鳥型配置とする燃焼構造の有効性を確認した。

なお、炭化室の乾留均一化には窯口部の乾留遅れを抑制

するために炉蓋プラグ厚みを適切に設計することも併せて考慮することが重要であると評価された。

最後に、本研究は石炭生産・利用技術振興費補助金の石炭燃焼技術開発（石炭高度転換コークス製造技術）に係る研究の一環として実施されたものであり、ここに関係各位に感謝の意を表します。

文 献

- 1) K.Nishioka: Proc. 3rd Int. Cokemaking Cong., CRM, Liège, (1996), 285.
- 2) H.Taketomi, K.Nishioka, Y.Nakashima, S.Suyama and M.Matsuura: 4th Int. Cokemaking Cong. Proc., ATS, Paris, (2000), 278.
- 3) T.Nakagawa, T.Arima, I.Komaki, Y.Suzuki, M.Yokomizo, I.Sugiyama and M.Fukunaga: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 135.