

研究論文

## 管状火炎における窒素酸化物の排出特性

— 1994年12月29日受理 —

朱 学雷†      西岡 牧人†  
田村 守淑‡      中村 泰久‡  
竹野 忠夫†

### 1 はじめに

管状火炎は、火炎の安定や構造に与える曲率の影響を伸長の効果と分離して調べることができ、火炎の基本的性質を明らかにする上で注目されている<sup>(1,2)</sup>。これまでにわれわれは、予混合気が外側から中心に向かって吹き出されたときに形成される管状火炎1について、一連の研究を行って火炎の安定と構造について検討してきた<sup>(3-7)</sup>。

また最近になって、予混合気を中心から外側に向かって吹き出したとき形成される管状火炎2についても検討を始めた。まず最初に、簡単な1段の総括反応に基づいて、火炎面モデルを用いた漸近解析と数値計算によって、火炎の構造と安定に与える伸長と曲率の効果を調べた<sup>(8-10)</sup>。また、正確な輸送係数および熱化学的定数を用いて、詳細な化学反応機構を考慮した計算を行い、総括反応を用いた場合の結果<sup>(10)</sup>と比較検討し、火炎の構造や安定に与える化学反応の効果を調べた。さらに、火炎背後の壁面での熱損失を考慮した計算を行い、火炎の安定や構造に与

える熱損失の効果についても検討した<sup>(11-13)</sup>。

ところが最近になって、管状火炎2をラディアントチューブに用いることが検討されている。このような実用的燃焼器においては、火炎の窒素酸化物  $\text{NO}_x$  の排出特性が極めて重要であり、あらかじめ十分な検討をしておく必要がある。

本研究においては、流れ場に対しては密度変化を考慮した相似解を用いるとともに、正確な輸送係数と熱化学的定数を用いて、詳細な化学反応機構を考慮した計算を行い、管状火炎2の  $\text{NO}_x$  の排出特性を調べることが目的とする。また、普通の予混合平面一次元火炎の  $\text{NO}_x$  の排出特性と比較検討し、管状火炎2の特徴を明らかにする。さらに、より現実的な条件、すなわち外壁面での熱損失が存在する場合について、 $\text{NO}_x$  の排出特性を調べ、熱損失が与える影響を明らかにすることを目的とする。

このため前報<sup>(13)</sup>と同様に、壁面での温度に対する以下の2つの境界条件を導入する。第1は断熱火炎温度より低い壁温を指定する条件、第2は壁面から流出する熱流束を指定する条件である。一方、外壁面での表面反応の効果については本研究の対象外とする。

† 名古屋大学工学部

‡ 東邦ガス株式会社総合技術研究所

## 2 解析モデルと支配方程式

図1に、管状火炎2の解析モデルを示す。円筒座標の原点を管の中心にとり、 $(x, r, \alpha)$ で軸方向、半径方向距離、および回転角度を表し、 $(u, v, w)$ でそれぞれの方向への速度成分を表す。与えられた温度  $T_{R0}$ 、 $i$ 成分の質量分率  $Y_{i,R0}$ の混合気が、回転する多孔質壁面より一様な速度  $(0, v_{R0}, w_{R0})$ で吹き出されて、半径方向に向かって流れ、火炎を通過した後に、燃焼ガスとなって外壁に沿って軸方向に外に向かって流れる。これによって内径  $R_0$ 、外径  $R$ の無限長さの管内に軸対称の管状火炎が形成される。ここで添字  $R_0$ は内壁での値を示す。

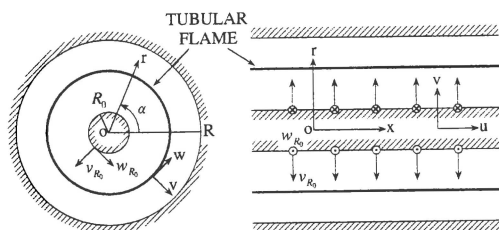


Figure 1 Tubular flame 2.

解析に用いた仮定、支配方程式、境界条件は前報<sup>(13)</sup>と同一であるので省略する。

## 3 化学反応機構

### 3.1 化学反応機構

本研究においては、希薄側から過濃側にかけて当量比の全範囲にわたるメタン空気火炎を対象とした。希薄混合気のみを対象とした前報の研究では、比較的簡単な C1-chemistry によって燃焼過程を十分に正確に記述することはできた。しかし、過濃混合気をも含む本研究においては、C1のみならず C2 構造を持つ分子の燃焼反応への寄与が極めて重要であり、その記述には C2-chemistry を採用する必要がある。この

Table 1 Adopted Species  
(Full NO<sub>x</sub>-C2)

CH <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub>	CH <sub>2</sub>	CH	CH <sub>2</sub> O	
HCO	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	H	O <sub>2</sub>
O	OH	HO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
N	NO	Ar	C <sub>4</sub> H <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub>
C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub>	
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H	CH <sub>2</sub> (S)	CH <sub>3</sub> O	CH <sub>2</sub> CO	
CH <sub>2</sub> OH	HCCOH	HCCO	C		
HCN	CN	NH	HCNO	HOCN	
NH <sub>2</sub>	NCO	C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	
HNCO	HNO	NNH	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> CN	

ため、本研究では、燃焼反応に対しては Miller と Bowman<sup>(14)</sup>の C2-chemistry、また NO<sub>x</sub>の生成に関しては彼らの提案した反応機構<sup>(14)</sup>全てを用いた。このときの成分は 52 種、素反応は 235 組となる。この反応機構を Full NO<sub>x</sub>-C2 と呼ぶことにする。表 1 に Full NO<sub>x</sub>-C2 において考慮した 52 種の成分を示す。

一般に NO の生成は、主として Thermal NO と Fenimore NO の 2 つの機構によるものと考えられている。しかし厳密には、それ以外の N<sub>2</sub>O および NO<sub>2</sub> を経山する生成機構の寄与も無視することはできない。NO<sub>x</sub>の排出特性を明らかにするためには、これらの全ての生成機構の寄与を分離して明らかにすることが望ましい。しかし一般に、これらの生成機構、特に Thermal NO と Fenimore NO の生成機構は、互いに密接に関連しているため、それぞれを分離してその寄与を明らかにするのは非常に困難である。

本研究では、他の研究で用いた方法<sup>(15,16)</sup>を用いて、各生成機構の寄与を分離して評価する。この方法では、Thermal NO による生成を分離して調べるため、同一の条件のもとで、同じ C2-chemistry を用いて燃焼反応を記述するとともに、NO の生成に関しては Thermal NO のみを

Table 2 Adopted Species  
(Thermal NO<sub>x</sub>-C2)

CH <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub>	CH <sub>2</sub>	CH	CH <sub>2</sub> O	
HCO	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	H	O <sub>2</sub>
O	OH	HO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
N	NO	Ar	C <sub>4</sub> H <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub>
	C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub>
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H	CH <sub>2</sub> (S)	CH <sub>3</sub> O	CH <sub>2</sub> CO	
	CH <sub>2</sub> OH	HCCOH	HCCO	C	

考慮した 37 種の成分, 154 組の素反応による反応機構を用いて, 同じ計算を行う. この反応機構を Thermal NO<sub>x</sub>-C2 と呼び, 表 2 に考慮した 37 種の成分を示す.

### 3.2 NO の各生成機構の寄与の分離

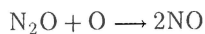
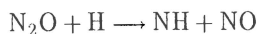
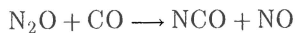
メタン空気予混合火炎における NO の 4 つの生成機構の寄与は以下の方法によって分離する.

#### (1) Thermal NO 機構

Thermal NO<sub>x</sub>-C2 によって計算された NO の生成量.

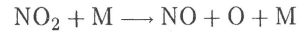
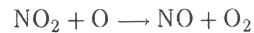
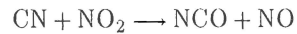
#### (2) N<sub>2</sub>O 機構

Full NO<sub>x</sub>-C2 によって計算された NO のうち, 以下の 3 つの反応による NO の生成量.



#### (3) NO<sub>2</sub> 機構

Full NO<sub>x</sub>-C2 によって計算された NO のうち, 以下の 5 つの反応による NO の生成量.



#### (4) Fenimore NO 機構

Full NO<sub>x</sub>-C2 によって計算された NO から上記の 3 種類の NO を除いた NO の生成量.

## 4 計算方法および計算条件

### 4.1 計算方法

数値計算は Kee らによって開発された汎用プログラム「CHEMKIN」<sup>(17-19)</sup>を用い, 一次元火炎に対するプログラム<sup>(20)</sup>を部分的に改造して行った. 基本的には, C1-chemistry を用いた前報の計算方法と同じ方法を用いたが, 成分の数は 20 から 52 へ, また素反応の数は 75 組から 235 組に増加している. 計算格子は不等間隔であり, 温度と各成分濃度の勾配あるいは 2 次微係数が限界値を超えると新たに格子点を設けた. 各方程式の対流項の離散化には精度のよい中心差分を用いた. 一般に解の精度は, 差分のスキーム, 格子の数および刻みの大きさに依存する. 本研究の計算においては, 上記の計算条件でさらに刻みを小さくして格子の数を増やしても, 得られた結果は変化しなかった. 従って, 十分な精度で計算が行われているものと考えられる.

### 4.2 計算条件

計算を行った管の大きさは, 前報<sup>(13)</sup>と同じく, 内径  $R_0 = 0.5$  cm, 外径  $R = 1.5$  cm である. また, 混合気の圧力  $p_{R0} = 1.0$  atm, 温度  $T_{R0} = 298$  K とし, 当量比  $\phi$  が 0.5 ~ 1.6 の混合気に対して, 吹き出し速度  $v_{R0}$  を変化させて

計算を行った。

熱損失の効果を調べるための一定の壁面温度としては、前報と同じく、断熱火炎の消炎時の火炎温度より約 100 K 低い温度を採用した。また、流出する熱流束に対応する一定の温度勾配の値も同様な考えで決めた。これらの計算結果を断熱の結果と比較検討した。

## 5 断熱火炎の NO<sub>x</sub> の排出特性

### 5.1 火炎構造と NO の各生成機構の寄与

まず Full NO<sub>x</sub>-C2 反応機構を用い、理論混合比の火炎の火炎構造について調べた。図 2 に、吹き出し速度  $v_{R0} = 1000$  cm/s の場合の火炎帯内部の温度分布と主な成分の濃度分布を、前報での C1-chemistry を用いた計算結果と比較して示す。縦軸は温度  $T$  と各成分のモル分率である。前報の C1-chemistry と今回の Full NO<sub>x</sub>-C2 反応機構を用いた計算結果には殆ど差異は存在しない。すなわち、主要な反応帯背後に CO, H<sub>2</sub>, H, OH, O など中間生成物や反応活性基が存在し、その再結合反応により火炎温度がこの領域で緩やかに上昇し、外壁において最大温度になる。しかし、外壁においても、これらの中間生成物がかなりの濃度で存在していることが分かる。

以上に示したように、理論混合比以下の希薄火炎の構造は C1-chemistry で十分に正確に記述することができる。また、図 2 で示すような火炎構造は、採用した NO の生成機構に殆ど無関係であり、Full NO<sub>x</sub>-C2 と Thermal NO<sub>x</sub>-C2 の計算結果は殆ど同じである。なお、本計算では前報と同じく、実験で観察される blue flame に対応させて、反応活性基 CH の最大濃度の位置を火炎位置  $r_*$  とした。

図 3 には、図 2 と同じ条件での火炎帯内部における NO<sub>x</sub> の濃度を示す。また図 4 に 4 つの生成機構別に NO の単位体積当たりのモル生

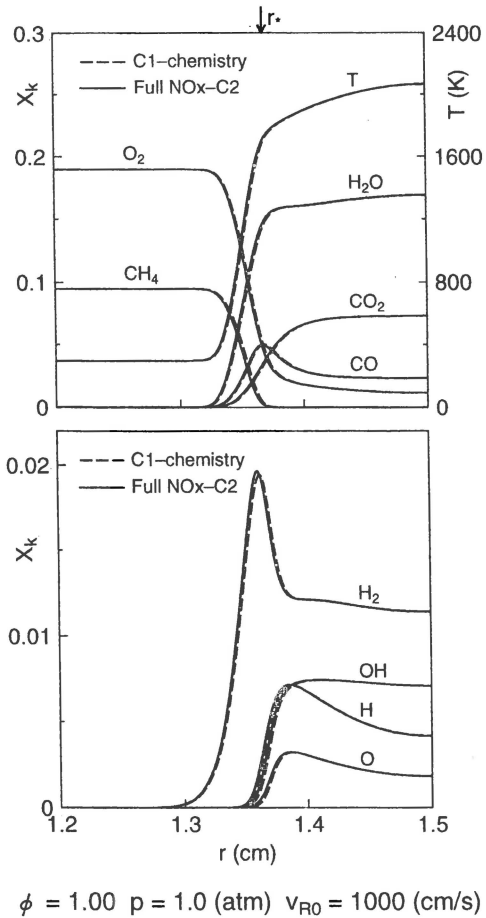


Figure 2 Flame structure.

成速度の空間分布を示す。図 3 より、NO<sub>2</sub> と N<sub>2</sub>O は NO に比べてはるかに低い濃度で存在し、また NO<sub>2</sub> は火炎帯の上流端の狭い領域にのみ存在することが分かる。一方、図 4 から分かるように、火炎帯の下流側で生成された NO は拡散によって上流側へ運ばれ、温度の低下とともに火炎帯の先端部で NO<sub>2</sub> 生成機構によって NO<sub>2</sub> に変換される。また、そのすぐ下流において、生成された NO<sub>2</sub> がほかの逆反応によって再び NO に還元される。このため、NO の生成速度は火炎帯の上流端において、NO<sub>2</sub> 経由の生成の谷と山の分布を持つ。一方、その下流の

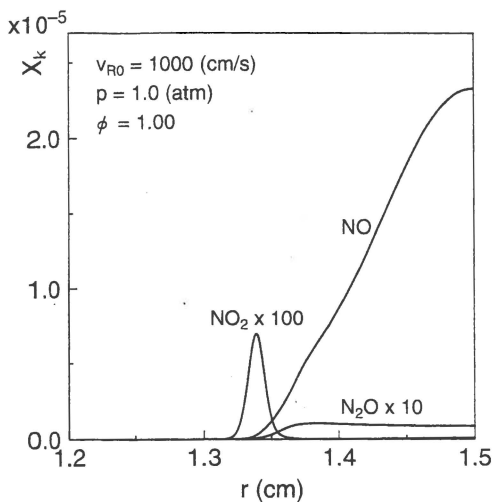


Figure 3 NO<sub>x</sub> concentration profiles.

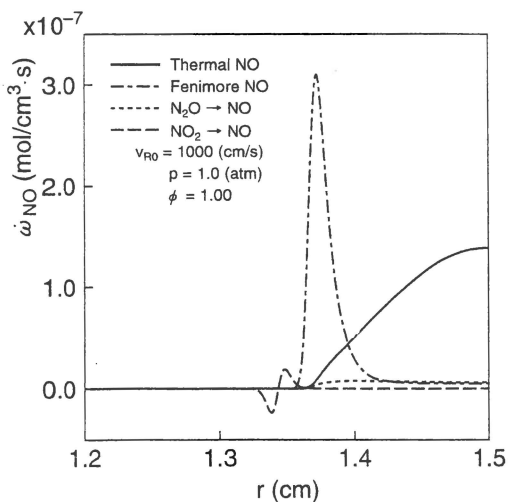


Figure 4 NO mole production rate profiles.

主要な反応帯においては、Fenimore 生成機構によって、NO が大量に生成され、その生成速度は鋭いピークを持つ。その後下流に向かって急速に小さくなる。さらに、主要な反応帯から下流にかけて、N<sub>2</sub>O 生成機構および Thermal 生成機構によって NO が生成される。このときの N<sub>2</sub>O 生成機構の寄与は、下流での Fenimore 生

成機構の寄与とほぼ同じであり、Thermal 生成機構に比べて非常に小さい。

## 5.2 吹き出し速度に対する応答

NO の排出特性を調べるために、次式で定義する単位火炎面積当たりの *i* 成分の生成速度  $\dot{\Omega}_i$  および Emission Index (*EI*) を導入する<sup>(21)</sup>。

$$\dot{\Omega}_i = \frac{1}{2\pi r_*} \int_{R_0}^R \dot{\omega}_i 2\pi r dr \quad (1)$$

$$EI = \frac{W_{NO} \dot{\Omega}_{NO}}{-W_{CH_4} \dot{\Omega}_{CH_4}} = \frac{\int_{R_0}^R W_{NO} \dot{\omega}_{NO} 2\pi r dr}{-\int_{R_0}^R W_{CH_4} \dot{\omega}_{CH_4} 2\pi r dr} \quad (2)$$

ここで  $W_i$ ,  $\dot{\omega}_i$  はそれぞれ *i* 成分の分子量と、反応による単位体積におけるモル生成速度を、また  $R_0$ ,  $R$  は管の内径と外径を表す。

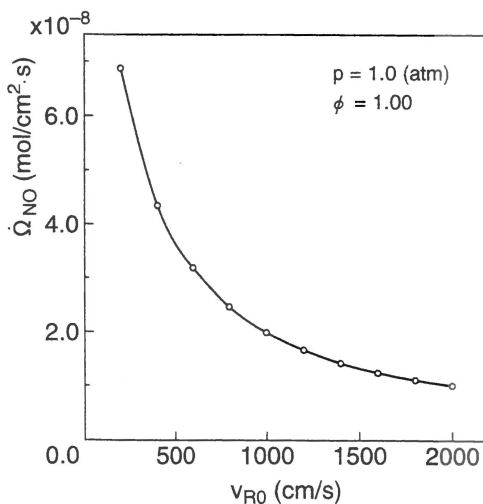


Figure 5 NO mole production rate as a function of injection velocity.

式 (1) の右辺の積分部分は単位火炎長さ当たりの *i* 成分の生成速度を表す。分母は単位火炎長さの火炎面積を表すので、 $\dot{\Omega}_i$  は単位火炎面

面積当たりの生成速度を表すことになる。また式 (2) の最初の式の分子および分母は、それぞれ単位火炎面積当たりの NO の質量生成速度および  $\text{CH}_4$  の質量消費速度を表す。従って EI は単位質量の  $\text{CH}_4$  の消費に対する NO の生成質量を表すことになる。

図 5 に、当量比  $\phi = 1.0$  において、吹き出し速度  $v_{R0}$  を変化させたときの単位火炎面積当たりの NO の生成速度の変化を示す。吹き出し速度の増加とともに NO の生成速度は単調に減少する。その理由を調べるため、吹き出し速度に対する各生成機構別の NO の EI の変化を調べた。その結果を図 6 に示す。

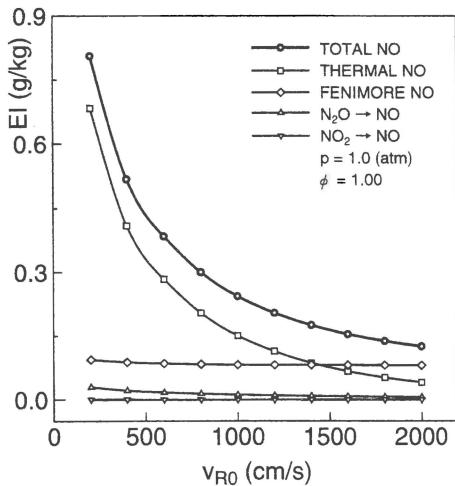


Figure 6 NO emission index as a function of injection velocity.

吹き出し速度が増加すると、全体 (Total NO) の EI が減少する。生成機構別の EI の変化を見ると、速度が遅いときには、Thermal NO の寄与が支配的であり、次に Fenimore NO が続く。 $\text{N}_2\text{O}$  や  $\text{NO}_2$  生成機構の寄与はわずかである。吹き出し速度の増加とともに Thermal NO は急激に減少する。その原因は滞在時間が減少することと火炎温度が低下することにある。Thermal NO は強い温度依存性を持ち、火炎温度が

低くなるに連れて NO の生成量が急速に減少する。また滞在時間にも強く依存する。一方、Fenimore NO については、吹き出し速度の増加に対して、NO の生成量は殆ど変化しない。これは Fenimore NO の生成が、図 4 に示したように、比較的短い時間内に行われ、滞在時間の影響を受けにくいと考えられる。このため、吹き出し速度  $v_{R0}$  が 1500 cm/s 以上になると、Thermal NO よりも Fenimore NO の寄与が大きくなり、支配的になることが分かる。また、 $\text{N}_2\text{O}$  および  $\text{NO}_2$  生成機構によって、NO はわずかながら生成および消費される。 $\text{N}_2\text{O}$  による生成は吹き出し速度の増加とともにわずかに減少するが、 $\text{NO}_2$  による消費は殆ど変化しない。

図 7 には、当量比  $\phi = 0.7, 1.0, 1.3$  における、吹き出し速度  $v_{R0}$  を変化させたときの単位火炎面積当たりの NO の生成速度の変化を、また図 8 には全体の EI の変化を示す。3 つの当量比とも、吹き出し速度の増加とともに NO の生成速度および EI が減少する。このときの EI の変化は、当量比  $\phi = 0.7$  と 1.3 に対しては比較的緩やかであるのに対して、当量比  $\phi = 1.0$  では変化が大きく、吹き出し速度の増加とともに、EI が急速に減少する。その理由は、当量比  $\phi = 1.0$  の場合に Thermal NO の寄与が一番大きく、吹き出し速度の増加による滞在時間の短縮や火炎温度の低下の影響が最も大きい。一方、当量比  $\phi = 1.3$  の場合には、滞在時間や温度への依存性の低い Fenimore NO の寄与が大きく、吹き出し速度の増加が NO の生成速度にそれほど影響を与えない。また、当量比  $\phi = 0.7$  の場合には、Thermal NO および Fenimore NO ともに少ないため、吹き出し速度の影響がそれほど強く現われない。

一方、吹き出し速度が遅いときには、当量比  $\phi = 1.0$  の場合の NO の生成速度は当量比  $\phi = 1.3$  の場合の 2 倍以上になっているが、前者が吹き出し速度の増加とともに急速に減少するため、速度  $v_{R0}$  が 1000 cm/s になると、両者の NO の生成速度は互いに近い値をとるようになる。

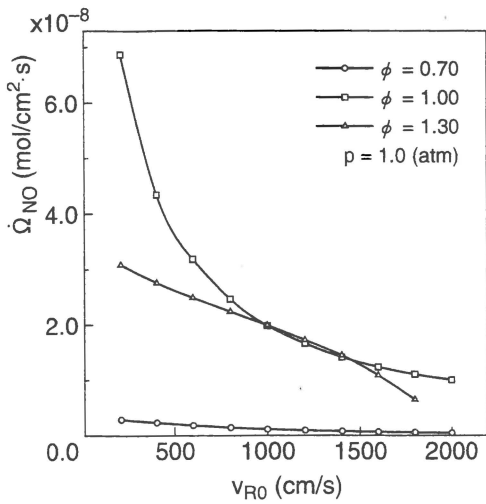


Figure 7 NO mole production rate as a function of injection velocity.

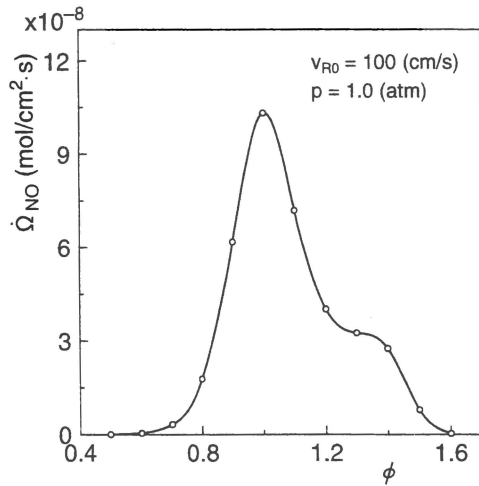


Figure 9 NO mole production rate as a function of equivalence ratio.

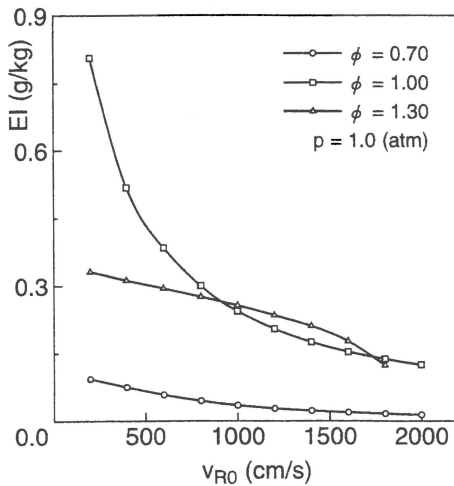


Figure 8 NO emission index as a function of injection velocity.

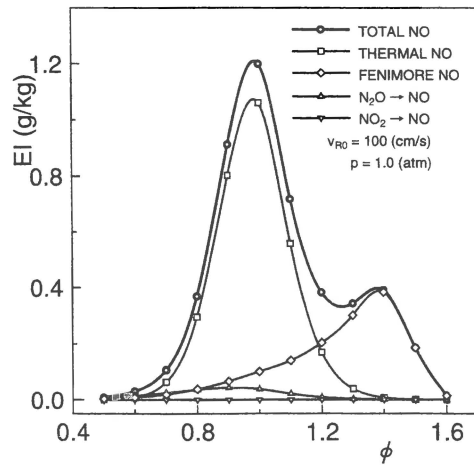


Figure 10 NO emission index as a function of equivalence ratio.

### 5.3 当量比に対する応答

図9には、吹き出し速度  $v_{R0} = 100$  cm/s の場合の、当量比  $\phi$  に対する単位火炎面積当たりのNOの生成速度の変化、また図10に生成機構別のNOのEIの変化を示す。希薄側では当量

比  $\phi$  が増加するとともに火炎温度が高くなり、温度依存性の強い Thermal NO が増加する。このため、NOの生成速度が当量比とともに急速に大きくなり、理論混合比付近で EI が最大になる。当量比が理論混合比を超えて増加すると、

火炎温度の低下とともに Thermal NO の生成速度が減少し、全体の EI も低下し始める。一方、Fenimore NO については、希薄側ではその寄与は小さいが、理論混合比を超えて過濃側に入るとともに、寄与が次第に大きくなり、当量比  $\phi = 1.4$  付近でその寄与が最大になる。このため、希薄側および理論混合比付近では Thermal NO が支配的であるのに対して、当量比  $\phi \geq 1.2$  の過濃側では逆に Fenimore NO が支配的になる。また、 $N_2O$  および  $NO_2$  機構の寄与はどの当量比に対してもわずかであるが、 $N_2O$  機構による EI は  $\phi = 0.90$  付近で小さなピークを持つ。これらを合わせた全体の EI は、理論混合比付近で最大値  $EI_{max} = 1.20 \text{ g/kg}$  を持つ。また、当量比  $\phi = 1.4$  付近では、Thermal NO の減少と Fenimore NO の増加とが重なって、小さなピークが現れる。

#### 5.4 平面一次元火炎との比較

普通の予混合平面一次元火炎について求めた、当量比  $\phi$  に対する生成機構別の NO の EI の変化<sup>(16)</sup>を図 11 に示す。ここで、式 (2) における EI の積分範囲は管状火炎 2 の場合のもの ( $R - R_0$ ) に合わせて、火炎帯の先端から 1.0 cm までの距離とした。図 10 の結果と比較すると、管状火炎 2 の当量比に対する EI の変化は平面一次元火炎のものとはほぼ同様なるまいを示すことが分かる。理論混合比付近での EI の最大値は、管状火炎 2 の  $EI_{max} = 1.20 \text{ g/kg}$  のに対して、平面一次元火炎では  $EI_{max} = 1.27 \text{ g/kg}$  である。図 6 から明らかなように、管状火炎 2 の  $EI_{max}$  は吹き出し速度に強く依存する。熱損失のない当量比  $\phi = 1.0$  の火炎について計算を行うと、消炎に至る臨界吹き出し速度は  $4591 \text{ cm/s}$  に達する<sup>(13)</sup>。このときの  $EI_{max}$  は  $0.2 \text{ g/kg}$  以下となり、このような高速の吹き出し速度で使用する場合には、NO の生成量が極めて小さくなる事が分かる。

平面一次元火炎においては、Thermal NO は

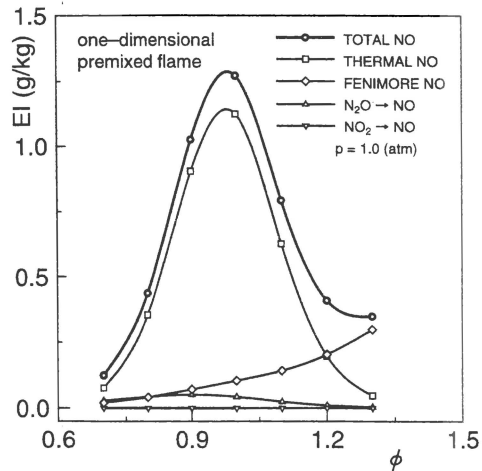


Figure 11 NO emission index as a function of equivalence ratio.

主として火炎帯下流において生成されるため、EI は式 (2) の積分の上限の位置に強く依存することが明らかにされている<sup>(16)</sup>。積分範囲が広がるほど、火炎帯での滞在時間が長くなり、Thermal NO がより多く生成される。これに対して、管状火炎 2 においては、壁面によって積分範囲が決められているため、生成量の最大値に限界が存在することになる。

## 6 熱損失の効果

### 6.1 吹き出し速度に対する応答

まず理論混合比の火炎について、NO の生成速度に与える熱損失の効果調べた。

図 12 に、2 つの型の熱損失を与えて、吹き出し速度  $v_{R0}$  を変化させたときの単位火炎面面積当たりの NO の生成速度の変化を、断熱火炎の場合と比較して示す。また図 13 に対応する EI の変化を示す。前報の計算に合わせて、一定の壁面温度としては  $1600 \text{ K}$ 、一定の外壁面での温度勾配としては  $-4870 \text{ K/cm}$  の値を用いてい



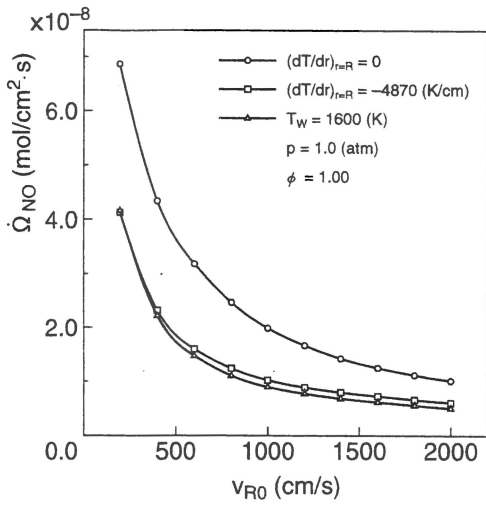


Figure 12 Effects of heat loss on NO mole production rate.

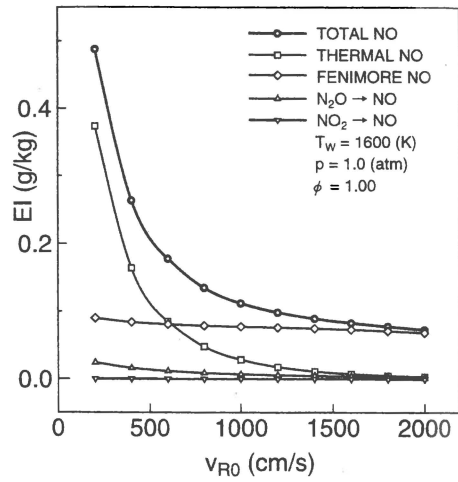


Figure 14 Effects of heat loss on NO emission index.

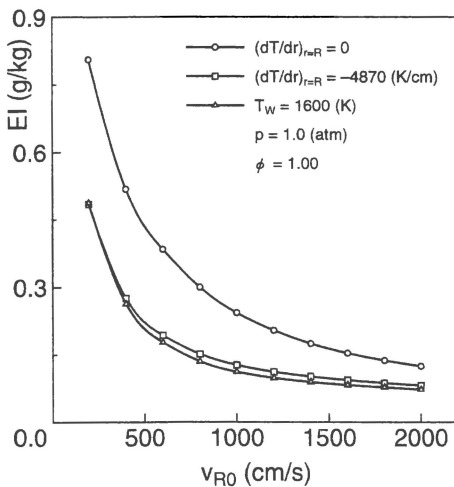


Figure 13 Effects of heat loss on NO emission index.

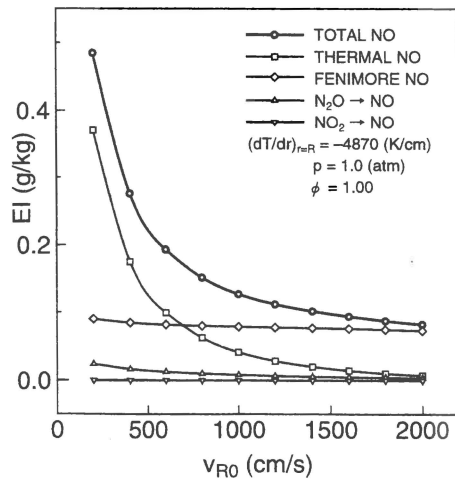


Figure 15 Effects of heat loss on NO emission index.

る。図から分かるように、いずれの火炎の場合も、吹き出し速度の増加とともに NO の生成速度および EI が減少している。熱損失が存在すると NO の生成速度が減少する。その効果は、特に吹き出し速度が遅いときに大きい。理論混

合比の火炎の場合には、Fenimore NO の寄与が少なく、殆どが温度依存性が高い Thermal NO によって生成される。このため、火炎温度の低下が EI を減少させるものと考えられる。なお熱損失の型が EI に与える効果は殆どない。

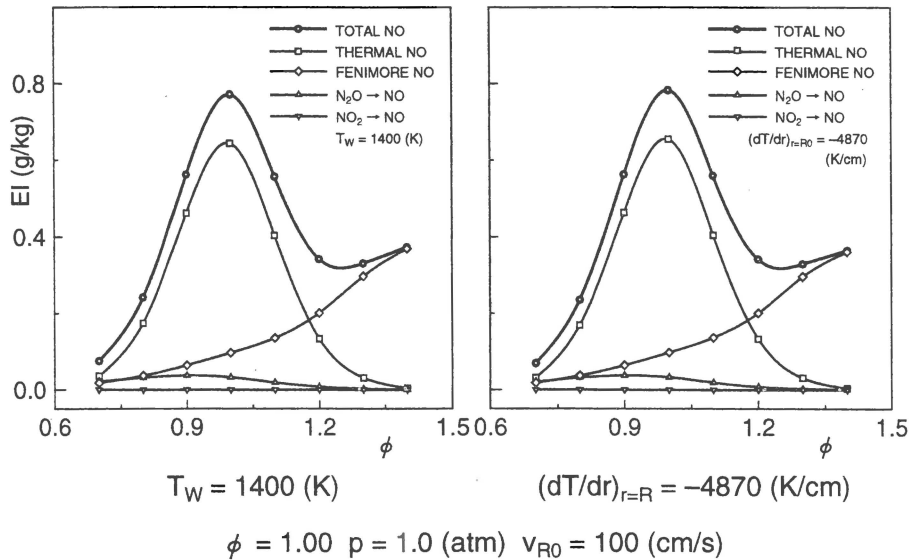


Figure 17 Effects of heat loss on NO emission index.

図 14 と図 15 に、理論混合比の火炎に対して上記の 2 つの型の熱損失が存在するとき、吹き出し速度  $v_{R0}$  を変化させたときの生成機構別の NO の EI の変化を示す。熱損失がある場合においても、生成機構別の EI は図 6 で示した断熱火炎の場合と同様なふるまいを示す。熱損失が存在するときには、火炎温度が低下するため、断熱の場合に比べて、Thermal NO の寄与が小さくなっている。特に吹き出し速度が速いときには、Thermal NO の寄与は殆どなくなることが分かる。一方、Fenimore NO,  $N_2O$  および  $NO_2$  生成機構による生成および消費は断熱の場合とほぼ同じ値を持ち、熱損失の影響を受けにくいことが分かる。以上のふるまいにおいて、熱損失の型による違いは殆ど見られない。

## 6.2 当量比に対する応答

図 16 に、熱損失がある場合の当量比による NO の EI の変化を、断熱火炎の場合と比較して示す。ここで前報に合わせて、一定の壁面温

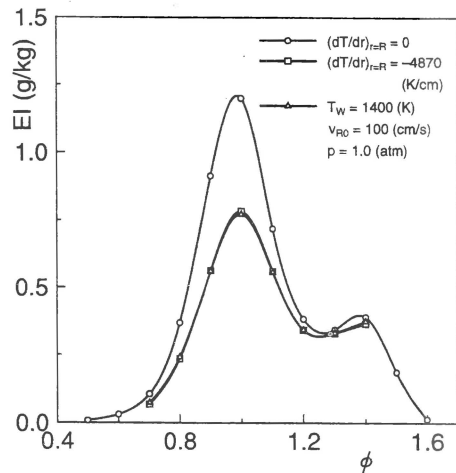


Figure 16 Effects of heat loss on NO emission index.

度としては、当量比  $\phi = 0.70$  における断熱火炎の消炎時の温度より約 100 K 低い 1400 K、また、一定の外壁面での温度勾配としては、-4870

K/cm の値を用いている。この図から明らかのように、熱損失が存在するとき、火炎温度の低下によって Thermal NO の生成速度が減少するため、希薄側および理論混合比付近での  $EI$  は、断熱火炎の場合よりかなり減少している。一方、Thermal NO の寄与が少なく、Fenimore NO が支配的になる過濃側では、 $EI$  が断熱火炎の場合とほぼ同じ値を持ち、熱損失は  $EI$  にあまり影響を与えない。また、熱損失の型の相違が  $EI$  に与える効果は殆どない。

図 17 に、上記の 2 つの型の熱損失が存在するとき、吹き出し速度  $v_{R0} = 100$  cm/s の場合の当量比  $\phi$  に対する生成機構別の NO の  $EI$  の変化を示す。熱損失が存在するときも、図 10 で示した断熱火炎の場合とほぼ同じ当量比依存性を示す。ただし、熱損失の存在による火炎温度の低下によって、Thermal NO の寄与が、断熱の場合に比べてかなり小さくなっている。一方、Fenimore NO,  $N_2O$  および  $NO_2$  生成機構の寄与は断熱の場合に比べて殆ど変わらない。

管状火炎 2 を実際にラディエントチューブに使用するときには、必ず外壁面での熱損失が存在するものと考えられる。従って  $EI$  は、特に希薄側および理論混合比付近において、断熱火炎に比べてかなり減少する筈である。すなわち、普通の予混合平面一次元火炎に比べて、NO の排出特性は著しく改善されるものと考えられる。

## 7 結論

1. 管状火炎 2 における生成機構別の NO の  $EI$  は、普通の予混合平面一次元火炎の場合と同様な当量比依存性を示す。また、平面一次元火炎に比べて、 $EI$  の値は小さい。特に吹き出し速度が大きいときには、著しく小さくなる。
2. 管状火炎 2 においては、吹き出し速度が遅いときには、Thermal NO が支配的であるのに対して、吹き出し速度が速いとき

には、Fenimore NO が支配的になる。吹き出し速度の変化が Thermal NO に与える影響が大きく、Fenimore NO にはそれほど影響を与えない。また、 $EI$  の大きな火炎ほど吹き出し速度の影響が大きい。

3. 熱損失があるとき、火炎温度が低下するため、Thermal NO の生成量が断熱火炎の場合に比べて小さくなる。特に吹き出し速度が小さいときその影響が大きい。一方、熱損失は Fenimore NO の生成にあまり影響を与えない。そのため、希薄側および理論混合比付近での  $EI$  は、断熱火炎の場合よりかなり小さい値を持つ。

## 参考文献

- (1) 竹野, 石塚, 西岡: 管状火炎の研究, 日本航空宇宙学会誌, 第 36 巻第 411 号, 1988 年, pp.173-180.
- (2) Ishizuka, S.: Characteristics of Tubular Flames, Progress in Energy and Combustion Science, Vol.19, 1993, pp.187-226.
- (3) Takeno, T. and Ishizuka, S.: A Tubular Flame Theory, Combustion and Flame, Vol.64, 1986, pp.83-98.
- (4) Takeno, T., Nishioka, M. and Ishizuka, S.: A Theoretical Study of Extinction of a Tubular Flame, Combustion and Flame, Vol.66, 1986, pp.271-283.
- (5) Nishioka, M., Takeno, T. and Ishizuka, S.: Effects of Variable Density on a Tubular Flame, Combustion and Flame, Vol.73, 1988, pp.287-301.
- (6) Nishioka, M., Inagaki, K., Ishizuka, S. and Takeno, T.: Effects of Pressure on Structure and Extinction of Tubular Flame, Combustion and Flame, Vol.86, 1991, pp.90-100.

- (7) 西岡, 竹野: 管状火炎に与える圧力拡散の効果, 第 30 回燃焼シンポジウム前刷集, 1992 年, pp.91-93.
- (8) 朱, 西岡, 竹野: 火炎の安定に与える流れと火炎の形状の効果, 第 29 回燃焼シンポジウム前刷集, 1991 年, pp.250-252.
- (9) 朱, 西岡, 竹野: 火炎の安定に与える曲率の効果, 第 30 回燃焼シンポジウム前刷集, 1992 年, pp.100-102.
- (10) 竹野, 朱, 西岡: 管状火炎の安定の研究, 燃焼研究, 97 号, 1994 年, pp.47-59.
- (11) 朱, 西岡, 田村, 竹野: 管状火炎の安定特性, 第 31 回燃焼シンポジウム前刷集, 1993 年, pp.201-203.
- (12) 朱, 西岡, 竹野, 田村, 中村: 管状火炎に与える熱損失の効果, 第 32 回燃焼シンポジウム前刷集, 1994 年, pp.56-58.
- (13) 朱, 西岡, 田村, 中村, 竹野: 管状火炎に与える化学反応と熱損失の効果, 燃焼研究, (印刷中)
- (14) Miller, J. A. and Bowman, C. T. : Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion, Progress in Energy and Combustion Science, Vol.15, No.4, 1989, pp.287-338.
- (15) Nishioka, M., Nakagawa, S. Ishikawa, Y. and Takeno, T. : NO<sub>x</sub> Emission Characteristics of Rich Methane-Air Flames, in Dynamics of Gaseous Combustion, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 151, AIAA. 1993, pp.141-162.
- (16) Nishioka, M., Nakagawa, S., Ishikawa, Y. and Takeno, T. : NO Emission Characteristics of Methane-Air Double Flame, Combustion and Flame, Vol.98, 1994, pp.127-138.
- (17) Kee, R. J., Rupley, F. M., and Miller, J. A. : Chemkin-II : A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics, Sandia Report, SAND89-8009B, November 1991.
- (18) Kee, R. J., Rupley, F. M., and Miller, J. A. : The Chemkin Thermodynamic data base, Sandia Report, SAND87-8215B, March 1990.
- (19) Kee, R. J., Dixon-Lewis, G., Warnatz, J., Coltrin, M. E. and Miller, J. A. : A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multicomponent Transport Properties, Sandia Report, SAND86-8246, December 1986.
- (20) Kee, R. J., Grcar, J. F., Smooke, M. D. and Miller, J. A. : A Fortran Program for Modeling Steady Laminar One-Dimensional Premixed Flames, Sandia Report, SAND85-8240, December 1985.
- (21) Takeno, T. and Nishioka, M. : Species Conservation and Emission Indices for Flames Described by Similarity Solutions, Combustion and Flame, Vol.92, 1993, pp.465-468.

## NO Emission Characteristics of Tubular Flame

Xue-lei Zhu, Makihito Nishioka, Moriyoshi Tamura,  
Yasuhisa Nakamura and Tadao Takeno

Department of Mechanical Engineering, Nagoya University  
Technical Research Institute, Toho Gas Co., Ltd.

A numerical study on NO emission characteristics of tubular flame of methane air mixtures was made. The calculation was made by using C2 chemistry for combustion reaction with the all mechanisms leading to NO formation including thermal and prompt NO mechanisms. The resulting scheme involves 52 species and 235 elementary reactions. The necessary thermochemical and transport properties were obtained from CHEMKIN data base. In order to study effects of heat loss, two types of boundary conditions at the downstream wall surface were introduced : constant wall temperature and constant temperature gradient. The emission characteristics were evaluated quantitatively in terms of the emission index. The calculated emission index shows the similar dependence on equivalence ratio to that of the normal premixed flame. However, the absolute value is smaller than the latter, especially when the mixture injection velocity is large. The main source of NO formation is thermal when the injection velocity is small and shifts to Fenimore as the velocity is increased. The presence of heat loss substantially decreases thermal NO and hence the total index for lean to stoichiometric flames.