

# ボイラ排ガス中の汚染質について

福島 悠 石黒 辰吉 岩崎 好陽  
小野塚 春吉 大平 俊男

## 要 約

窒素酸化物（以下NO<sub>x</sub>と略す）を中心に大中小型ボイラ排ガスを測定した。その結果、NO<sub>x</sub>濃度と空気比（以下  $m$  と略す）との関係は一山型を示した。しかしその時の NO<sub>x</sub>濃度を  $m=1.00$  に換算した換算NO<sub>x</sub>濃度は  $m$  を増すと順次増加し、ほぼ一定値に近づく傾向を示した。

A, C 重油中の窒素分（以下N分と略す）の NO への交換率は、燃焼条件により異なり、約10~60%の値であった。

A, C 重油燃焼排ガスの湿式法による脱硫効率は、燃料消費量、脱硫塔入口換算濃度により異なり約65~85%の値であった。

また  $m$  を極端に下げた異常燃焼時には、通常燃焼時に比べ NO<sub>x</sub> 濃度、二酸化炭素（以下 CO<sub>2</sub> と略す）濃度は減少し、二酸化硫黄（以下 SO<sub>2</sub> と略す）濃度、全炭化水素（以下 T-HC と略す）濃度は増加した。

## はじめに

固定発生源のうち燃焼施設、特に大型ボイラや中型ボイラからの排ガス中に含まれている窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）、硫黄酸化物（SO<sub>x</sub>）、炭化水素（HC）等の汚染質についての測定はすでに行われている<sup>1)</sup>。

しかしこれらのデータは、汚染質の排出係数を算定することを目的としているため、測定対象施設の多くは通常運転時のものである。

一方、燃焼により排出される NO<sub>x</sub> 濃度は、燃焼条件の一つである  $m$  や燃料油中の N 分含有率や燃焼装置によって影響される<sup>2)</sup>。また HC も通常運転時にはその排出濃度は低いが、 $m$  を無理に下げた異常燃焼の場合や着火・消火時には高濃度で排出される。

## 1. 目 的

ボイラの燃焼条件である燃料、燃料消費量、 $m$  を変化

表1 測定対象施設

	国立劇場	東京国立近代美術館	旭電化(王子工場)	サントリー(武蔵野工場)
測定期間	48. 6.27~29	48. 7.18~20	48. 10.22~28	49. 7.16~19
ボイラ型式	昭和鉄工 5016	前田鉄工 M2012S	三菱CE水管	タクマMPO
設置年月日		42.12.26製造	40.9	37.8
伝熱面積	38.3m <sup>2</sup>	27.2m <sup>2</sup>	134.6m <sup>2</sup>	334m <sup>2</sup>
重油	A (S=0.9%)	A (S=0.8%)	C (S=1.9%)	A (S=0.63%) C (S=2.56%)
消費量	通常 130 ℓ/h 最大 200 ℓ/h	通常 70 ℓ/h	9000 ℓ/h	600 ℓ/h
排ガス量	1950Nm <sup>3</sup> /h	1050Nm <sup>3</sup> /h	136,000Nm <sup>3</sup> /h	9000Nm <sup>3</sup> /h
バーナ	オイルバーナNo.6	S.TジョンソンPN モーターモデル No.62168-ASD	蒸気噴霧式	JHY型 蒸気噴霧式
用途	暖房用	暖房用	発電用	
運転状況	冬	冬	24時間	一部24時間

させた場合の汚染質、特に NO<sub>x</sub> の排出傾向の変化を中心に調査する。

同時に SO<sub>x</sub>, HC についても調査する。

## 2. 調査方法

### (1) 調査対象ボイラの選定とその規模

都内における重油消費量で東電・東ガスに続く大規模重油消費工場である旭電化王子工場の自家発電用ボイラを、大規模発生源調査の一環として調査した。また中規模重油消費工場であるサントリー武蔵野工場を調査した。また、暖房用ボイラとして都内で二大シェアをもつ昭和鉄工所、前田鉄工所のセクショナルボイラ（伝熱面積は30㎡）を国立劇場および東京国立近代美術館の協力を得て調査した。表1に対象ボイラの規格、測定期間を示す。

### (2) 測定機器

排ガス中の代表的汚染質の測定のために窒素酸化物計（NO<sub>x</sub>計）、二酸化硫黄計（SO<sub>2</sub>計）、炭化水素計（T-HC計）を使用し、連続測定を行った。

燃焼状態把握のために酸素計（O<sub>2</sub>計）、二酸化炭素計（CO<sub>2</sub>計）を、また排ガス温度測定には熱電対を使用し

た。なお燃料消費量はボイラ付設の油量計によった。

また排ガス測定時に使用した燃料の元素分析は理化学研究所に委託した。表2に使用した測定器を示す。

### 3. 測定位置

旭電化王子工場、サントリー武蔵野工場での測定位置を図1、2に示す。セクショナルボイラの場合はボイラ直後の煙道で測定を行った。

### 4. 結果および考察

#### (1) 燃焼条件と窒素酸化物

サントリー武蔵野工場の中型ボイラについて得られた測定結果は次のようである。

A重油燃焼排ガスの測定結果の詳細を表3に示す。これより  $m$  と NO<sub>x</sub> 濃度との関係を図3に、また  $m=1.00$  に換算したときの換算 NO<sub>x</sub> 濃度と  $m$  との関係を図4に示す。C重油について同様な関係を図5、6に示す。

国立劇場、東京国立近代美術館のセクショナルボイラのA重油燃焼についての  $m$  と NO<sub>x</sub> 濃度との関係を図7、8に示す。

これらの結果から次のようなことがいえる。すなわ

表2 測定方法

	測定原理	メーカー	タイプ	測定範囲
SO <sub>2</sub>	赤外線吸収法	横 河	8230	0～200ppm
NO <sub>x</sub>	化学発光法	日立堀場	ENOA-C201	0～100 0～500 ppm 0～1,000
	赤外線吸収法	横 河	8240	0～200 0～500 ppm
T-HC	FIDつき ガスクロマトグラフィ法	島 津	HCM-1A	0～1, 5, 10, 50 0～100, 500, 1,000 0～5,000, 10,000
O <sub>2</sub>	磁気式	ミ タ カ	635II	0～10 % 0～25 %
		富 士 電 機	ZAG-1A	0～10 % 0～25 %
CO <sub>2</sub>	熱伝導度法	富 士 電 機	ZAF-1A	0～10 % 0～20 %
温度	熱電対式	横 河	2671	0～1,000 °C 0～300 °C

表3 各燃料消費量における代表的汚染質と燃焼状態  
(サントリ-武蔵野工場 2号ボイラ熱交換器後, 1974.7.16)

重油消費量 (t/h)	ダンパー開度 (%)	O <sub>2</sub> (%)	空気比	NO <sub>x</sub> (ppm)		SO <sub>2</sub> (ppm)		T-HC (ppm-c)		CO <sub>2</sub> (%)		温度(°C)	備考
				実測	換算	実測	換算	実測	換算	実測	換算		
4 0 0	14(定格)	3.3	1.19	53	65	500	595	欠測		5.0	6.0	135	
"	18	4.3	1.26	68	90	340	430	欠測		13.0	16.4	140	
4 3 0	23	5.5	1.36	78	105	350	475	6	10	11.8	16.0	150	
4 2 0	27	8.5	1.68	78	130	300	505	欠測		9.4	15.8	145	
4 0 0	31	9.7	1.86	68	125	270	500	欠測		8.4	15.6	140	
5 0 0	20(定格)	3.5	1.20	58	70	(645)	(775)	2150	2580	0.6	0.7	140	
"	24	4.0	1.24	65	80	370	460	15	20	13.2	16.4	145	
"	27	5.5	1.36	80	110	350	475	欠測		12.0	16.3	140	
"	30	6.5	1.45	85	125	320	465	欠測		11.1	16.1	140	
"	35	8.0	1.62	80	130	290	470	欠測		9.9	16.0	145	
"	41	8.8	1.73	75	130	300	520	15	25	9.2	16.0	150	
7 3 5	40(定格)	3.3	1.19	65	80	(600)	(715)	440	525	5.9	7.0	160	煙や
"	47	3.3	1.19	80	95	410	490	14	15	13.2	15.7	160	
"	34	3.4	1.19	65	80	(630)	(750)	2100	2500	ゼロふりきり		155	黒いス
"	51	4.8	1.30	95	125	350	455	16	20	12.7	16.5	155	
"	56	5.4	1.35	95	130	340	460	14	20	12.2	16.5	160	
"	65	6.3	1.43	95	135	330	470	13	20	11.4	16.3	165	
9 0 0	62(定格)	3.3	1.19	73	85	620	740	140	165	6.8	8.1	185	
"	58	3.4	1.19	68	80	610	725	450	535	3.1	3.7	180	
"	69	3.4	1.19	93	110	460	545	11	15	13.0	15.5	185	
"	72	3.4	1.19	93	110	450	535	11	15	13.2	15.7	190	
"	82	3.5	1.20	98	120	420	505	10	10	13.6	16.3	185	
"	89	3.7	1.21	100	120	410	495	11	15	13.6	16.5	185	
"	77	3.8	1.22	100	120	410	500	11	15	13.5	16.5	190	
"	100	4.8	1.30	105	135	380	495	10	15	12.6	16.4	190	

ただし、( ) は外挿値を示す。

図1 旭電化における測定位置

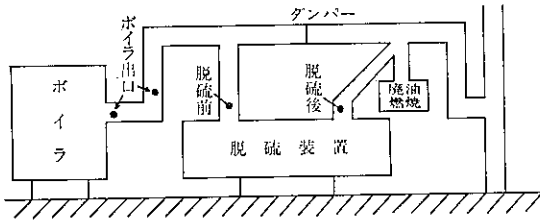
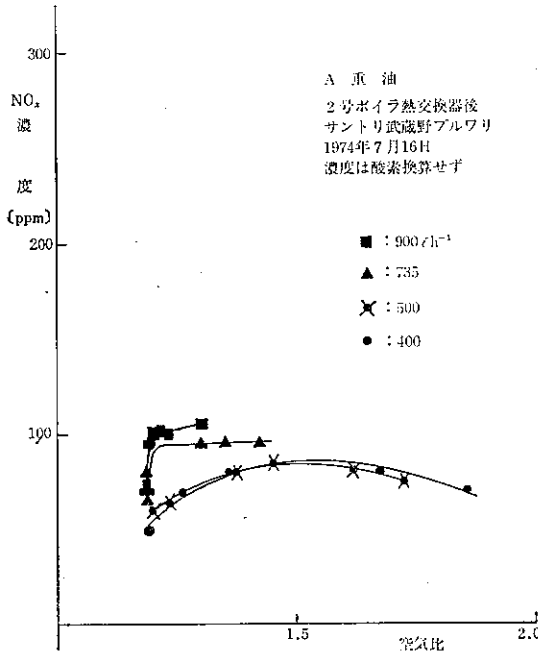


図3 各燃料消費量における空気比とNOx濃度



ち、 $m$  と  $\text{NO}_x$  濃度の関係は一山型を示し、燃料消費量を増加させると、その最大値は低空気比側に移動するとともに高くなり、かつその山の傾きは鋭くなる (図3, 5, 7, 8 参照)。また、 $m$  と  $\text{NO}_x$  濃度を  $m=1.00$  に換算した換算  $\text{NO}_x$  濃度との関係を見ると、 $m$  を増加すると換算  $\text{NO}_x$  濃度は順次増加し、ほぼ一定値に近づく傾向を示す。(図4, 6 参照)

また大中小型ボイラの通常運転時の  $\text{NO}_x$  排出濃度を表4に示す。これからわかるように、A 重油燃焼の場合、小型ボイラ、中型ボイラからはそれぞれ  $m=1.00$  に換算した換算  $\text{NO}_x$  濃度で約80, 130ppmであった。またC 重油燃焼では、大中型ボイラとも約240ppmであった。

(2) 燃料中の窒素含有率と窒素酸化物

図2 サントリーにおける測定位置

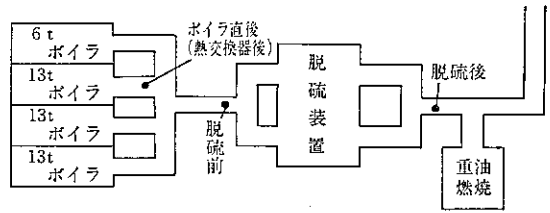
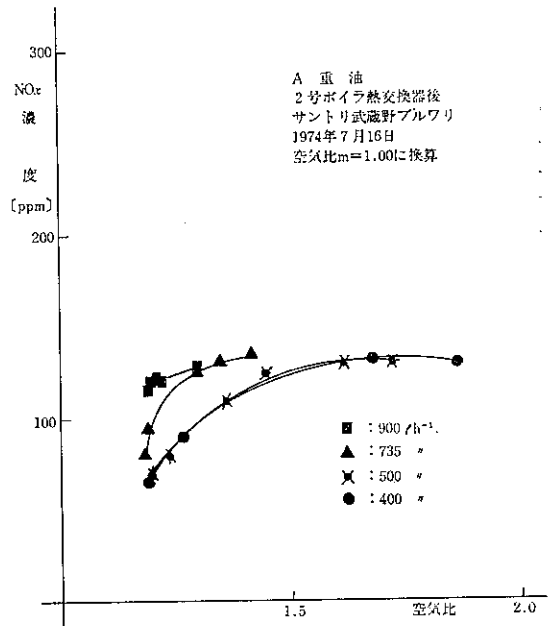


図4 各燃料消費量における空気比と換算NOx濃度



サントリーの中型ボイラについて得られた結果から、燃料中の  $N$  分の一酸化窒素 ( $\text{NO}$ ) への変換率を燃料消費量および  $m$  を変えて求める。

ここで、同一燃料消費量、同一空気比でA, C 重油を燃焼した場合、次の仮定が成立するものとする。

- ① 排ガス中の  $\text{NO}$  は燃料中の  $N$  分による  $\text{NO}$  と熱生成による  $\text{NO}$  との和である。

$$\text{NO} = \text{NO}^F + \text{NO}^T \quad [\text{ppm}] \quad (1)$$

$\text{NO}$ ; 排ガス中の  $\text{NO}$

$\text{NO}^F$ ; 燃料中の  $N$  分による  $\text{NO}$

$\text{NO}^T$ ; 熱生成による  $\text{NO}$

- ② A, C 重油中の  $N$  分の  $\text{NO}$  への変換率は等しい。

$$x = y \quad (2)$$

図5 各燃料消費量における空気比とNO<sub>x</sub>濃度

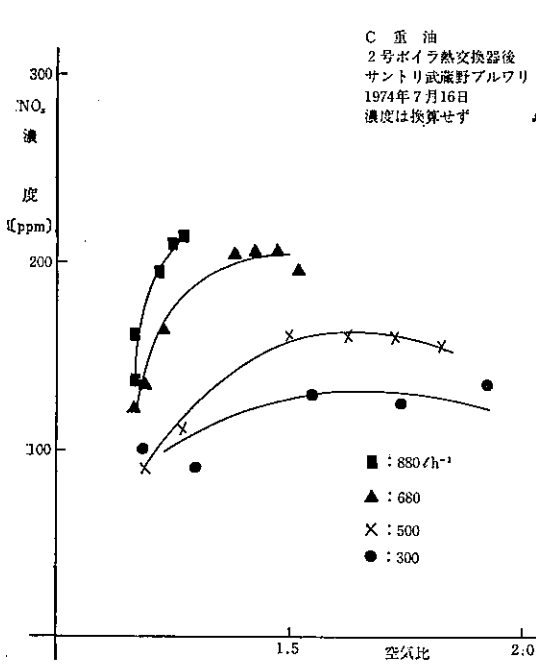


図6 各燃料消費量における空気比と換算NO<sub>x</sub>濃度

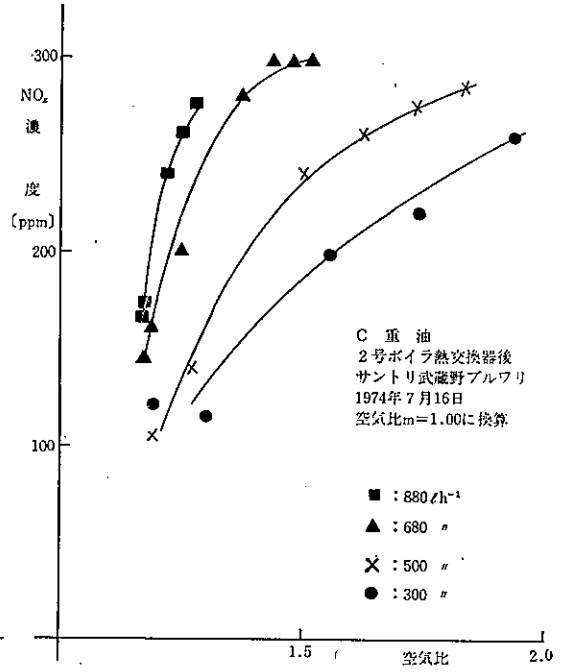


図7 各燃料消費量における空気比とNO<sub>x</sub>濃度

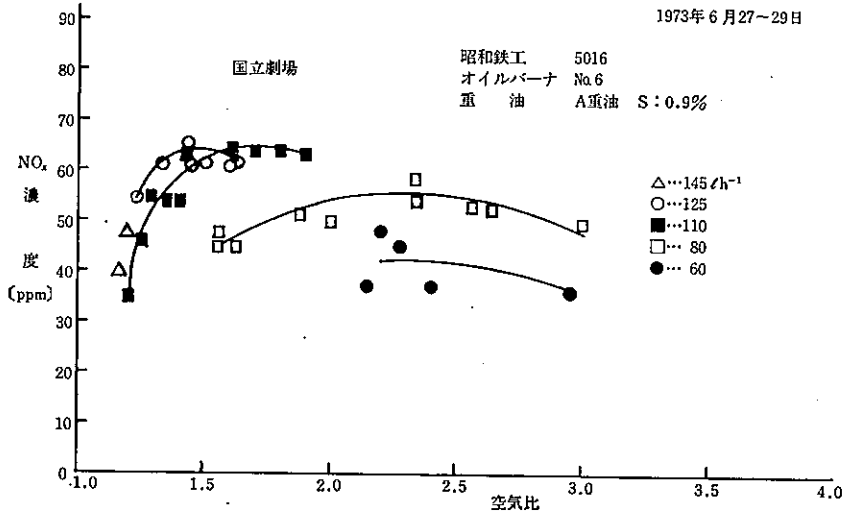
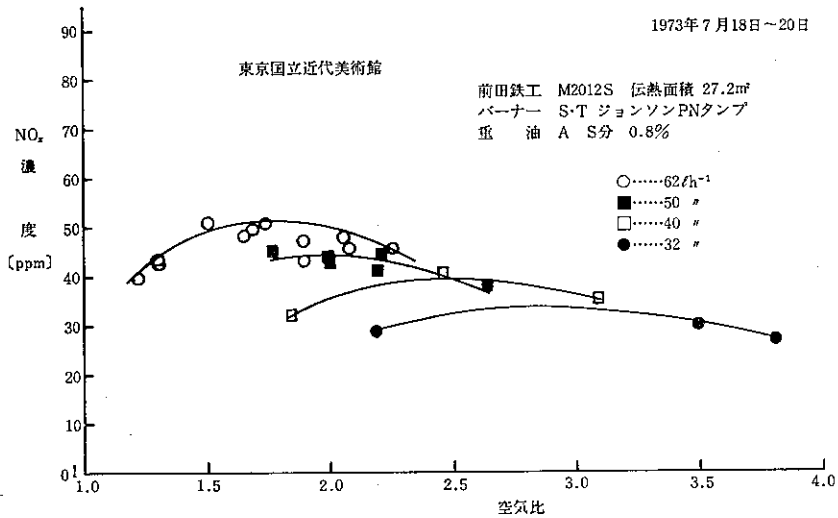


図8 各燃料消費量における空気比とNO<sub>x</sub>濃度



x; A 重油の変換率 [%]

y; C " "

③ A, C 重油からの熱生成 NO は等しい.

$$NO^{T(A)} = NO^{T(C)} \quad [\text{ppm}] \quad (3)$$

NO<sup>T(A)</sup>; A 重油からの熱生成 NO

NO<sup>T(C)</sup>; C " "

また, A 重油の元素分析値は C: 85.86, H: 13.29, S: 0.63, N: 0.02% であり C 重油では C: 83.92, H: 11.29, S: 2.56, N: 0.2% であった. ただし N 分の分析値は石油会社の分析表によった.

A, C 重油の元素分析値から, それらの理論乾き排ガスを計算すると<sup>9)</sup>, それぞれ 9.93, 10.04 N m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> である.

また, A 重油中の N 分は 0.02% であるので, 生成される NO は燃料 1 kg 当り

$$0.02 \times 10^{-2} \times 22.4 \times (14)^{-1} = 3.2 \times 10^{-4} \quad [\text{N m}^3]$$

である. これを理論乾き排ガス量で割ると NO の濃度が求まる. すなわち A 重油中の N 分がすべて NO になったとすると 32 ppm になる. これは m=1.00 に換算しているので換算 NO 濃度である. 同様に C 重油の場合は換算 NO 濃度で 307 ppm になる.

仮定(1)を A, C 重油に適用すると次式が成立する.

$$NO^A = NO^{F(A)} + NO^{T(A)} \quad [\text{ppm}] \quad (4)$$

$$NO^C = NO^{F(C)} + NO^{T(C)} \quad [\text{ppm}] \quad (5)$$

表4 定格運転における NO<sub>x</sub> 濃度

	伝熱面積	燃料消費量	空気比	NO <sub>x</sub> 濃度	
				実測	換算
A 重油	27m <sup>2</sup>	62ℓh <sup>-1</sup>	1.5	51	77
	38	125	1.3	60	78
	334	700	1.3	85	111
C 重油	334	700	1.3	190	247
	1346	9,000	1.3	190	247

ただし, 添字 A, C はそれぞれ A, C 重油を示す.

また A, C 重油中の N 分のうち x, y % が NO に変換したとすると次の式が成立する.

$$NO^{F(A)} = 32 \times x \times 10^{-2} \quad [\text{ppm}] \quad (6)$$

$$NO^{F(C)} = 307 \times y \times 10^{-2} \quad [\text{ppm}] \quad (7)$$

式(6)を(4)に代入すると

$$\begin{aligned} NO^{T(A)} &= NO^A - NO^{F(A)} \\ &= NO^A - 0.32x \quad [\text{ppm}] \end{aligned} \quad (8)$$

式(7)を式(5)に代入すると

$$\begin{aligned} NO^{T(C)} &= NO^C - NO^{F(C)} \\ &= NO^C - 3.07y \quad [\text{ppm}] \end{aligned} \quad (9)$$

仮定(2)を式(9)に代入すると

$$NO^{T(C)} = NO^C - 3.07x \quad [\text{ppm}] \quad (10)$$

仮定(3)より式(8), (10)は等しいので次式が成立する.

表5 各燃料消費量における空気比と換算NOx濃度(m=1.00)

空気比	重油	燃料消費量 t/h			
		300	500	700	900
1.2	C	100	110	160	240
	A	(70)	70	85	115
1.3	C	130	165	240	290
	A	(100)	100	110	130
1.4	C	160	210	290	300
	A	(115)	120	130	135
1.5	C	180	240	300	(300)
	A	(130)	130	130	135
1.6	C	200	250	300	(300)
	A	(135)	135	135	135

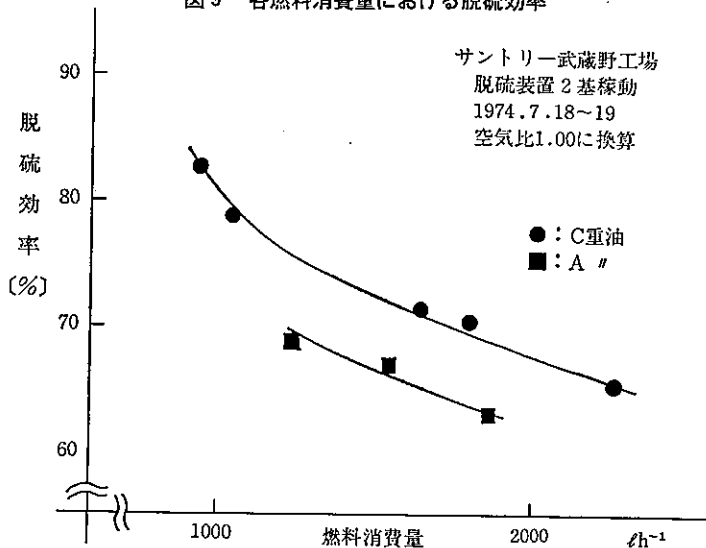
ただし( )は外挿値.

表6 燃料中の窒素分の変換率

空気比	燃料消費量 t/h			
	300	500	700	900
1.2	(10)	14	27	45
1.3	(10)	23	47	58
1.4	(16)	32	58	60
1.5	(18)	40	61	(60)
1.6	(23)	41	(60)	(60)

ただし( )は外挿値.

図9 各燃料消費量における脱硫効率



$$\begin{aligned} \text{NO}^C - \text{NO}^A &= 3.07x - 0.32x & (1) \\ &= 2.75x \text{ [ppm]} \end{aligned}$$

燃焼により生成する NOx のほとんどは NO であるので、 $\text{NO}_x^C \approx \text{NO}$  とみなすと次の式が成立する。

$$\text{NO}_x^C - \text{NO}_x^A = 2.75x \text{ [ppm]} \quad (2)$$

すなわち  $m=1.00$  に換算した換算 NOx 濃度を A, C 重油について求めると、燃料中の N 分の NO への変換率が求められる。

そこで燃料消費量,  $m$  を同一にして A, C 重油を燃焼した場合の換算 ( $m=1.00$ ) NOx 濃度を表 5 に、そのときの変換率を表 6 に示す。この値から判断すると、変換率は約 10~60% の間であるといえよう。

(3) 脱硫効率

C 重油燃焼を行う旭電化、サントリーの大中型ボイラについては、排ガス脱硫装置 (KBCA-B I 600 および KBCA-B II 200) がそれぞれ 2 基ずつ設置されていた。

そこで、燃料別に燃料消費量をかえたときの脱硫効率をサントリーの場合についてみると、図 9 のようになった。

脱硫効率は、脱硫塔の出口濃度 ( $C^0$ ) と入口濃度 ( $C^E$ ) の比によって求まる。すなわち、

$$\text{脱硫効率} = \{1 - C^0 \times (C^E)^{-1}\} \times 100 \text{ [%]}$$

となる。

同一燃料では燃料消費量を増すと  $C^E$ ,  $C^0$  ともに増すが、その増加率は  $C^0$  が  $C^E$  にまさるため  $C^0/C^E$  が大きくなり、脱硫効率は減少している。

同一燃料消費量るとき、 $C^E$ を増すと $C^O$ も増すが、その増加率は $C^E$ が $C^O$ にまさるため $C^O/C^E$ が小さくなり、脱硫効率は増大してくる。

#### (4) その他

$m$ を極端に下げた異常燃焼時は、通常燃焼時に比べ $NO_x$ 濃度、 $CO_2$ 濃度は減少しているが、 $SO_2$ 濃度、T-HC濃度は増加している。

すなわち、 $m$ を極端に下げた場合には、燃料の不完全燃焼により $NO_x$ 、 $CO_2$ の発生量の減少およびT-HCの発生量の増加を示すものと考えられる。一方、そのときの $SO_2$ の発生量は減少こそすれ増加するとは考えられないので、このときの $SO_2$ 濃度の増加は不完全燃焼による排ガスの体積減少であるか、赤外線吸収法を用いている $SO_2$ 測定方法自体に対する汚染質(例えば $CO$ 、 $HC$ )の測定値に対するプラスの誤差のためと考えられる。

#### 5. 今後の課題

炭化水素において、その組成の検討、サンプリング系から検出器まで保温した場合としない場合の検討をする。また、排ガス量の連続測定および重金属の定性・定量、また発ガン性物質をはじめとする未知物質の検討等が今後に残されている課題である。

おわりに当り、本調査の際にご協力いただいた各工場担当者、並びにボイラ技士の方々に謝意を表したい。

#### 参 考 文 献

- 1) 東京都公害局規制指導部：大気汚染物質排出係数算出調査，1973年6月
- 2) 辻正一：窒素酸化物の生成抑制，熱管理と公害，25，(5)，1973
- 3) 吉田高年：燃焼工学，共立出版，1971