

# NO<sub>x</sub>の累積排出量が制約された場合の

## 火力発電機群起動停止問題 (第1報)\*

中 村 陽 一\*\*

奈 良 宏 一\*\*

山 城 迪\*\*

(昭和53年4月28日受理)

### Startup and Shutdown Problem of Thermal Generating Units with Constrained Total Nitrogen Oxides Emissions (Part 1)

by Yoichi NAKAMURA, Koichi NARA  
and Susumu YAMASHIRO

This paper presents a scheduling method for thermal generating units, that will control the total nitrogen oxides emissions via generation shifting and operative pattern changing. This method, of course, can be used ordinarily, moreover during a shortage of available low pollution fuel. We have found that in the USA this low pollution fuel became extremely expensive and supplies became uncertain in about 1965. Furthermore we can use this method when the nitrogen oxides removal systems require much time for their design, construction and testing before they can be brought online.

By this method, we can decide the units commitment and schedule their output so as to comply with constrained nitrogen oxides emissions, and simultaneously economic optimum operation will be achieved.

#### 1. ま え が き

大気汚染にかかわる物質のうち、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)については、昭和48年5月に環境基準が設定され、原則として5年以内に達成するものとされた。それ以来、固定発生源および移動発生源(自動車)のそれぞれについて数次にわたる排出規制が行われるなど、国をあげてNO<sub>x</sub>汚染防止に取り組んできたにもかかわらず、「53年までの達成は不可能である」との結論が産業構造審議会より52年12月に通産大臣に答申された。

そこで今回、おもな固定発生源の1つとされる火力発電所について、累積排出量を制約した場合の最適起動停止問題について考察を行うことにする。本手法は、従来行われてきた、淨

\* 電気学会全国大会で一部発表(昭和53年4月)

\*\* 北見工業大学電気工学科

化装置の改良あるいは燃料の軽質化に依らず、発電機間の負荷分担および起動停止パターンの変更により制約値を満足するところに特徴がある。従って本手法は、日常の運用に対してはもとより、昭和40年頃にアメリカ合衆国で見られたような軽質燃料の昂騰、あるいは浄化装置の利用が経済的、技術的な理由から困難な場合にも適用可能であると考えられる。また、本論では最後に、モデル系統に対し適用し、その結果についても考察する。

2. 瞬時の排出量制約に対する運用

2.1 NO<sub>x</sub> の排出量

一般に火力発電所からのNO<sub>x</sub>の排出量は(1)式で表わされる<sup>1)</sup>。ここでy<sub>i</sub>はi号機から排出されるNO<sub>x</sub>量であり、α<sub>i</sub>, β<sub>i</sub>, γ<sub>i</sub>は発電機の定数であり、G<sub>i</sub>は出力である。

$$y_i = \alpha_i + \beta_i \cdot G_i + \gamma_i \cdot G_i^2 \quad (1)$$

M. R. Gent, J. W. Lamont 両氏は、実測結果よりNO<sub>x</sub>排出量は(2)式で示されると報告しているが<sup>2)</sup>第1図に示すように、この関係は(1)式で充分近似できると思われるので、以下では排出量y<sub>i</sub>は(1)式で扱うことにする。なお、(2)式において、A<sub>i</sub>, B<sub>i</sub>, C<sub>i</sub>, D<sub>i</sub>は発電機の定数である。

$$y_i = A_i + B_i \cdot G_i + C_i \cdot \exp(D_i \cdot G_i) \quad (2)$$

2.2 負荷配分

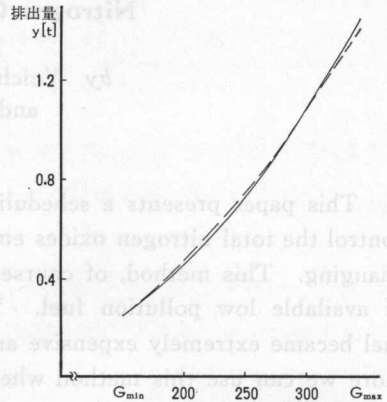
送電損失を無視した場合、従来行われてきた経済負荷配分では(3)式に示す目的関数を考え、この(3)式を最小化するために等増分燃料費の法則を用いて(4)式を解いて最適負荷配分を行ってきた<sup>3)</sup>。ただしF<sub>i</sub>はi号機の運転費であり、ここでは出力G<sub>i</sub>の2次式で考えることにする。

$$\psi = \sum_i F_i + \lambda(P_R - \sum_i G_i) \quad (3)$$

$$\frac{dF_i}{dG_i} = \lambda \quad (4)$$

また、λはLagrangeの未定乗数であり、P<sub>R</sub>は負荷である。この(4)式から得られる経済負荷配分によるとき必然的に排出されるNO<sub>x</sub>の排出量をy<sub>0</sub>とする。(5)式に示す不等式を満足するようなレベルjの排出量制約y<sub>j</sub>が与えられたとき、(6)式に示すような目的関数を考える。ただし、送電損失は無視する。

$$\bar{y}_j \leq y_0$$



第1図 NO<sub>x</sub> 排出量の2次近似

Fig. 1. Quadratic approximation of nitrogen oxides emissions.

—:  $y = 0.07127 - 9.306 \times 10^{-4} \times G + 1.434 \times 10^{-5} \times G^2$   
 - - - -:  $y = -0.693 + 7.01 \times 10^{-10} \times G + 0.505 \times \exp(4.16 \times 10^{-3} \times G)$

$$\varphi_U(\bar{y}_j) = \sum_{i \in U} F_i + \lambda(P_R - \sum_{i \in U} G_i) + \mu(\bar{y}_j - \sum_{i \in U} y_i) \quad (6)$$

$$\frac{dF_i}{dG_i} = \lambda + \mu \left( \frac{dy_i}{dG_i} \right) \quad (7)$$

$$\Phi_U(\bar{y}_j) = \min_{G_i} \left\{ \varphi_U(\bar{y}_j) \right\} \quad (8)$$

ここで  $U$  は第3章1節で示す手法により求めた並列発電機群であり、 $\mu$  は Lagrange の未定乗数である。この(6)式を最小化するために(7)式を解けば排出量制約を満足する最適負荷配分が得られることになり、このときの値を(8)式に示すように  $\Phi_U(\bar{y}_j)$  とする。なお制約値  $\bar{y}_j$  が  $y_0$  より大きいときは(4)式により最適負荷配分を行うことにする。

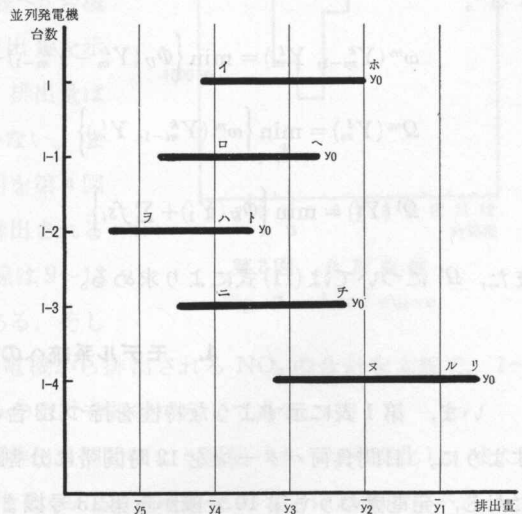
### 3. 累積排出量制約に対する運用

#### 3.1 並列発電機群

最適並列発電機群を求めるためには、厳密には可能な全ての発電機の組み合わせについて検討しなければならないが<sup>4)</sup>、その並列発電機群の種類は、構成発電機台数の増加により、幾何級数的に増大することになる。ここでは優先順位により並列発電機群を決定しても、結果的に最適性が大きく損われることはないと考えて<sup>5)</sup>、優先順位法により並列発電機群を決定することにし、その優先順位の決定方法について以下に述べる。

発電機運転パターンが、累積排出量制約と経済性の面からのみ決定されるとき、そのパターンは過去のパターンに影響されないマルコフ的特性を持つから、ここでは、負荷パターンのうちピーク負荷から解析を始め、順次負荷レベルを下げて行き、最後に最低負荷について解析を行うことにする。

I 台の発電機から構成される系統を考えて、いまある負荷を与えたとき、並列運転機台数と排出量の関係は、たとえば第2図のようになる。ただし(5)式を満足する範囲で考えることにする。「優先順位を決定する」とは、たとえばロの点で運転するとき、I-1 台で運転するために「解列すべき1台の発電機を選ぶ」とことと言える。ここでは、与えられた負荷と排出量制約に対して優先順位を考えることにする。即ち、第2図において排出量制約  $\bar{y}_4$  が与えられたとき、始めに全機並列のイの点における運転を求める。次にこのイの点における運



第2図 排出量と発電機台数の関係

Fig. 2. Relation between emission and units number.

転をしたとき、最も発電単価の大きな発電機を解列してロの点の並列発電機群とする。以下同様に、ロの点における運転をしたとき、最も発電単価の大きな発電機を解列してハの点の並列発電機群が求まる。ニの点の並列発電機群も同様である。ただし、(4)式を解いて得られる排出量  $y_0$  を与える点ホ、ヘ、ト、チ、リについては排出量制約を考えず、経済性のみ注目して優先順位を求める。即ち、ホの点で最も発電単価の大きな発電機を解列したのがヘの点の並列発電機群であり、ヘの点の最も発電単価の大きな発電機を解列してトの点の並列発電機群とする。同様な考え方で優先順位を求めて行くので、ヌの点についてはホの点で運転をしたとき、発電単価の大きい順に 4 台解列してヌの点の並列発電機群とする。また上位並列発電機群で排出量制約が満足されていない点ル、ヲについては、排出量制約が多少変化しても優先順位は近似的に同じであると考えて、それぞれ、ハの点と同じ並列発電機群を用いることにする。あるいは与えられた負荷の大きさによっては I 台全機並列で運転不可能な場合も考えられ、その場合 I-1 台の並列発電機群は負荷レベルが多少変化しても優先順位はあまり大きく変わらないものと考えて、すでに計算してある負荷レベルのうち全機並列運転可能な最低負荷レベルについての優先順位（これは直前に計算してある負荷レベルにおける優先順位に一致する）を用いることにする。

### 3.2 発電機の起動停止

ここでは、発電機の最適運転パターンをダイナミックプログラミング法<sup>6)</sup>により求めることにする。第 3 章 1 節で述べたような降順になっている負荷パターンにおいて、 $m$  番目の負荷レベルまでの累積排出量を  $Y_m^k$  とするとき、最適運用費用は (9)、(10) 式の関数漸化式を解くことにより得られる。ここで  $fs_i$  は  $i$  号機の起動費であり、停止時間に対し線型な関数であるとする<sup>4)</sup>。

$$\omega^m(Y_{m-1}^k, Y_m^l) = \min_U \left\{ \Phi_U(Y_m^l - Y_{m-1}^k) + \sum_{i \in U} fs_i + \Omega^{m-1}(Y_{m-1}^k) \right\} \quad (9)$$

$$\Omega^m(Y_m^l) = \min_{Y_{m-1}^k} \left\{ \omega^m(Y_{m-1}^k, Y_m^l) \right\} \quad (10)$$

$$\Omega^1(Y_1^l) = \min_U \left\{ \Phi_U(Y_1^l) + \sum_{i \in U} fs_i \right\} \quad (11)$$

また、 $\Omega^1$  については (11) 式により求める。

## 4. モデル系統への適用および考察

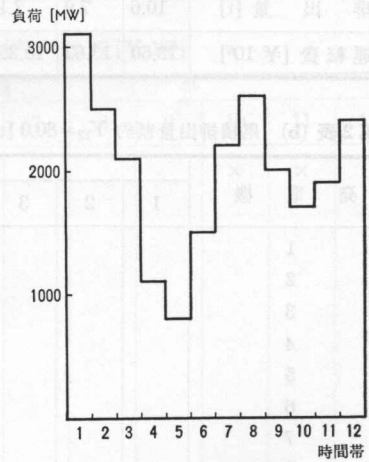
いま、第 1 表に示すような特性を持つ 13 台の発電機からなる系統を考える。第 3 図に示すように、日間負荷パターンを 12 時間帯に分割し発電機の最適起動停止パターンを求める。ただし、発電機のうち第 10 号機から第 13 号機までの 3 台はベース火力として常に並列するものとする。13 台全ての発電機について排出量が制約されるものとした場合の計算結果を第 2 表 a~f に示す。表中×印が解列、空欄が並列を表わす。第 2 表 a は、経済性のみ注目して

第1表 発電機特性

Table 1. Characteristics of generator

発電機 No.	燃料費 $F=a+bG+cG^2$ [千円/時]			$G_{min}$ [MW]	$G_{max}$ [MW]	排出量 $y=\alpha+\beta G+\gamma G^2$ [t/h]			起動費 [千円/時]
	$a$	$b$	$c [\times 10^{-3}]$			$\alpha$	$\beta [\times 10^{-4}]$	$\gamma [\times 10^{-5}]$	
1	23.2000	2.8500	5.6700	40.0	175.0	0.29980	-28.1300	0.9833	1.50
2	23.2000	2.6500	5.6700	40.0	163.0	0.29980	-28.1300	0.9833	1.70
3	23.2000	2.6500	5.6700	60.0	236.0	0.29980	-28.1300	0.9833	3.00
4	12.8900	1.8900	8.2100	60.0	236.0	0.10780	-8.8740	0.8149	3.00
5	12.8900	1.8900	8.2100	60.0	232.0	0.10780	-8.8740	0.8149	3.50
6	11.0000	1.8800	8.1100	60.0	232.0	0.11010	-9.2920	0.8311	3.50
7	11.0000	1.8800	8.1000	80.0	236.0	0.11010	-9.2920	0.3811	4.00
8	13.5000	1.7700	9.0000	80.0	236.0	0.81150	-6.3750	0.7949	4.00
9	13.5000	1.7700	9.0000	80.0	233.0	0.81150	-6.3750	0.7949	4.50
10	14.5100	1.6660	7.1900	80.0	233.0	0.83300	-6.8590	0.8158	4.50
11	14.5100	1.6660	7.1900	150.0	344.0	0.08330	-6.8590	0.8158	0.00
12	6.9000	1.6480	1.0500	150.0	344.0	0.05591	-7.9550	0.7355	0.00
13	5.0000	0.6500	1.0500	150.0	344.0	0.07127	-9.3060	1.4340	0.00

排出量を制約しなかった場合の例である。また、第9号機~12号機までが人口密集地帯から離れて設置されており、排出量が制約されないものと仮定した場合の計算結果を第3表 a~f に示す。第3表 a は経済性のみに注目した場合で、当然第2表 a と運転パターンは一致するが、第3表 a の排出量は第1号機~8号機まで、および13号機のみについての合計排出量を示している。同様に第3表 b~f についても、排出量は第9号機~12号機による排出量を含んでいない。また、各累積排出量制約に対する最適運用費用を第4図に示す。図中、実線は13台の発電機から排出されるNO<sub>x</sub> 全てについて制約した場合であり、点線は9~12号機以外の発電機について制約した場合である。そして、それぞれの場合について13台全ての発電機から排出されるNO<sub>x</sub> の合計を太線で、1~8号機および13号機から排出されるNO<sub>x</sub> のみの合計を細線で示してある。



第3図 負荷曲線  
Fig. 3. Load curve.

第2表、第3表からわかるように、累積排出量制約により運転パターンも変化し、また各時間帯における運転費用、NO<sub>x</sub> 排出量も変化している。即ち、このことは起動停止パターン、および負荷配分を変化させることにより各排出量制約に適応した運用が可能であることを示している。また第2表 (a) および (b) を比較すると、累積排出量制約 80.0 [t] を与えられることに



第2表 全発電機の排出量を制約した場合の最適運転パターン

Table 2. Optimal operative pattern with constrained emissions for all generators

空欄：並 列 ×：解 列

第2表 (a) 累積排出量制約  $Y_{12}=84.13$  [t] (制約なし) の場合、累積運転費  $\Omega^{12}=118.93$  [¥ 10<sup>6</sup>]

発 電 機	時 間 帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1				×	×	×				×	×	
2				×	×	×						
3				×	×	×						
4					×							
5					×							
6					×							
7				×	×							
8				×	×							
9				×	×							
10					×							
11												
12												
13												
排 出 量 [t]	10.6	7.9	7.1	5.2	4.0	5.9	7.3	8.3	7.0	6.5	6.7	7.7
運 転 費 [¥ 10 <sup>6</sup> ]	19.60	13.62	10.25	3.63	2.23	5.89	11.05	14.52	9.46	7.24	8.71	12.73

第2表 (b) 累積排出量制約  $Y_{12}=80.0$  [t] の場合、累積運転費  $\Omega^{12}=119.64$  [¥ 10<sup>6</sup>]

発 電 機	時 間 帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1				×	×	×				×	×	
2				×	×	×				×		
3				×	×	×						
4					×							
5					×							
6					×							
7				×	×							
8				×	×							
9					×							
10												
11												
12												
13												
排 出 量 [t]	10.6	7.8	6.8	4.0	3.0	5.6	7.0	8.2	6.8	6.2	6.6	7.4
運 転 費 [¥ 10 <sup>6</sup> ]	19.60	13.64	10.29	3.87	2.41	5.96	11.08	14.53	9.48	7.29	8.71	12.79

第2表(c) 累積排出量制約  $Y_{12}=75.0$  [t] の場合, 累積運転費  $Q^{12}=121.28$  [¥ 10<sup>6</sup>]

発 電 機	時 間 帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1				×	×	×				×	×	
2				×	×	×						
3				×	×	×						
4					×							
5					×							
6				×	×	×						
7				×	×							
8					×							
9					×							
10					×							
11				×	×							
12				×	×							
13				×	×							
排 出 量 [t]	10.6	7.8	6.4	3.4	3.0	4.8	6.6	8.0	6.0	5.2	5.8	7.4
運 転 費 [¥ 10 <sup>6</sup> ]	19.60	13.64	10.43	4.07	2.41	6.22	11.23	14.60	9.74	7.60	8.97	12.79

第2表(d) 累積排出量制約  $Y_{12}=70.0$  [t] の場合, 累積運転費  $Q^{12}=123.47$  [¥ 10<sup>6</sup>]

発 電 機	時 間 帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1				×	×	×				×	×	
2				×	×	×						
3				×	×							
4					×							
5				×	×							
6				×	×	×						
7				×	×							
8					×							
9					×							
10					×							
11				×	×							
12				×	×							
13				×	×							
排 出 量 [t]	10.6	7.4	5.8	3.2	2.2	4.4	6.0	8.0	5.4	4.8	5.4	6.8
運 転 費 [¥ 10 <sup>6</sup> ]	19.60	13.81	10.67	4.16	2.79	6.40	11.49	14.60	9.98	7.77	9.14	13.06

第2表 (e) 累積排出量制約  $Y_{12}=65.0$  [t] の場合, 累積運転費  $Q^{12}=126.24$  [¥ 10<sup>6</sup>]

発電機	時間帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1				×	×	×				×		
2				×	×	×						
3				×	×							
4					×							
5					×	×				×		
6						×	×					
7						×	×					
8						×						
9						×						
10												
11												
12												
13												
排出量 [t]	10.4	6.8	5.2	2.8	2.2	4.0	5.6	7.4	5.0	4.4	4.8	6.4
運転費 [¥ 10 <sup>6</sup> ]	19.70	14.16	11.00	4.39	2.79	6.62	11.72	14.94	10.21	7.98	9.45	13.29

第2表 (f) 累積排出量制約  $Y_{12}=60.0$  [t] の場合, 累積運転費  $Q^{12}=130.15$  [¥ 10<sup>6</sup>]

発電機	時間帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1				×	×	×				×		
2				×	×							
3				×	×							
4					×							
5					×	×						
6						×	×					
7						×						
8						×						
9						×						
10												
11												
12												
13												
排出量 [t]	10.2	6.4	4.8	2.6	2.0	3.2	5.2	7.0	4.6	3.8	4.2	6.0
運転費 [¥ 10 <sup>6</sup> ]	19.86	14.49	11.34	4.53	2.92	7.27	12.03	15.24	10.51	8.45	9.91	13.61



第3表 第1~8号機および13号機のみを制約した場合の最適運転パターン

Table 3. Optimal operative pattern with constrained emissions for No. 1~8 and No. 13

空欄: 並列 ×: 解列

第3表(a) 第1~8号機, 13号機にのみ制約が与えられる場合  
累積排出量制約  $Y_{12}=55.91$  [t] (制約なし) の場合, 累積運転費  $\Omega^{12}=118.93$  [¥ 10<sup>6</sup>]

発電機	時間帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1				×	×	×				×	×	
2				×	×	×						
3				×	×	×						
4					×							
5					×							
6					×							
7				×	×							
8				×	×							
9				×	×							
10					×							
11												
12												
13												
排出量 [t]	6.9	5.2	4.8	3.4	2.6	3.8	4.9	5.4	4.8	4.5	4.5	5.1
運転費 [¥ 10 <sup>6</sup> ]	19.60	13.62	10.25	3.63	2.23	5.89	11.05	14.52	9.46	7.24	8.71	12.73

第3表(b) 第1~8号機, 13号機にのみ制約が与えられる場合  
累積排出量制約  $Y_{12}=50.0$  [t] の場合, 累積運転費  $\Omega^{12}=119.97$  [¥ 10<sup>6</sup>]

発電機	時間帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1				×	×	×			×	×	×	
2				×	×	×				×		
3				×	×	×						
4					×							
5					×							
6					×							
7				×	×							
8					×							
9					×							
10												
11												
12												
13												
排出量 [t]	6.6	5.0	4.6	1.4	1.2	3.6	4.6	5.2	4.4	4.0	4.4	5.0
運転費 [¥ 10 <sup>6</sup> ]	19.63	13.66	10.28	4.10	2.42	5.95	11.10	14.55	9.51	7.31	8.72	12.74

第3表(c) 第1~8号機, 13号機にのみ制約が与えられる場合  
 累積排出量制約  $Y_{12}=45.0$  [t] の場合, 累積運転費  $Q^{12}=121.59$  [¥ 10<sup>6</sup>]

発電機	時間帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1				×	×	×			×	×	×	
2				×	×	×				×		
3				×	×	×						
4					×							
5				×	×	×						
6					×	×						
7				×	×	×						
8					×	×						
9					×							
10					×	×						
11					×	×	×					
12					×	×	×	×				
13					×	×	×	×	×	×	×	×
排出量 [t]	6.6	5.0	4.0	1.4	1.0	2.6	4.2	5.2	3.8	3.0	3.4	4.8
運転費 [¥ 10 <sup>6</sup> ]	19.63	13.66	10.48	4.10	2.48	6.26	11.24	14.55	9.72	7.64	9.04	12.80

第3表(d) 第1~8号機, 13号機にのみ制約が与えられる場合  
 累積排出量制約  $Y_{12}=40.0$  [t] の場合, 累積運転費  $Q^{12}=123.68$  [¥ 10<sup>6</sup>]

発電機	時間帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1				×	×	×			×	×	×	
2				×	×	×				×		
3				×	×	×						
4				×	×							
5				×	×	×						
6					×	×						
7				×	×	×						
8					×	×						
9					×							
10					×	×						
11					×	×	×					
12					×	×	×	×				
13					×	×	×	×	×	×	×	×
排出量 [t]	6.4	4.4	3.4	1.4	0.8	2.4	3.6	4.8	3.2	2.6	3.0	4.0
運転費 [¥ 10 <sup>6</sup> ]	19.72	13.91	10.72	4.10	2.57	6.34	11.49	14.72	9.97	7.81	9.21	13.13

第3表 (e) 第1~8号機, 13号機にのみ制約が与えられる場合  
累積排出量制約  $Y_{12}=35.0$  [t] の場合, 累積運転費  $Q^{12}=126.34$  [¥ 10<sup>6</sup>]

発 電 機	時 間 帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1				×	×	×				×	×	
2				×	×	×				×		
3				×	×	×						
4					×							
5					×							
6					×							
7				×	×							
8					×							
9					×							
10												
11												
12												
13												
排 出 量 [t]	6.4	3.8	2.8	1.4	0.8	2.0	3.0	4.0	2.6	2.2	2.6	3.4
運 転 費 [¥ 10 <sup>6</sup> ]	19.72	14.22	11.04	4.10	2.57	6.54	11.81	15.14	10.30	8.03	9.42	13.46

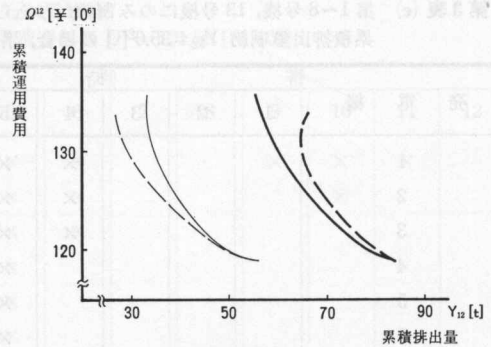
第3表 (f) 第1~8号機, 13号機にのみ制約が与えられる場合  
累積排出量制約  $Y_{12}=30.0$  [t] の場合, 累積運転費  $Q^{12}=129.97$  [¥ 10<sup>6</sup>]

発 電 機	時 間 帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1				×	×					×	×	
2				×	×					×		
3				×	×							
4					×							
5					×							
6					×							
7				×	×							
8					×							
9					×							
10												
11												
12												
13												
排 出 量 [t]	5.8	3.2	2.4	1.4	0.6	1.6	2.6	3.4	2.2	1.8	2.2	2.8
運 転 費 [¥ 10 <sup>6</sup> ]	20.16	14.64	11.33	4.10	2.70	6.82	12.09	15.58	10.61	8.34	9.70	13.91

より、第4および第5時間帯においてそれぞれ9, 10号機が並列しているが、第10時間帯では2号機が解列している。このことは、発電機の性能を排出量の面から考えるとき、排出量制約が厳しくなるにつれて、性能の劣る発電機は解列し性能の優る発電機は並列させて最適パターンを得ていると理解できる。しかし累積排出量制約が75.0 [t]より厳しくなると、第10時間帯の2号機は再び並列している。これは発電機の運転費および排出量の非線型性によるものであるが、同時にこのことは、第3章1節で述べたような、優先順位を荷役レベルと排出量制約の両面から決定することの妥当性をも示している。なお、このような傾向は第3表の第9時間帯における1号機にも見られる。

次に第4図を見ると、排出量制約が厳しくなるにつれて、累積運用費用も増加していることがわかる。また、同じ費用を投入して運用する場合を考えると、一部の発電機のみを制約した場合は制約付けられた発電機からの排出量(細い点線)は減少するが、そのときの全体の排出量(太い点線)は全体を制約するとき(太い実線)よりも常に大きくなっている。また、全体の発電機の排出量を制約した場合と一部の発電機の排出量のみを制約した場合のそれぞれについて、全体の発電機による排出量曲線と一部の発電機による排出量曲線において、同じ運用費用を与える点はそれぞれ同一の運転パターンによることに注目すると、一部の発電機の排出量のみを制約した場合の例では、ある制約値(28.6 [t])以下の厳しい制約を与えると、全体の排出量は逆に増加する傾向を示す。これは制約付けられた発電機群は、排出量を抑制するが(細い点線)残りの制約されない発電機群による排出量が急激に増加するためであると考えられる。これと似たような傾向は、全体を制約した例においての56.5 [t]以下の厳しい制約を与えた場合にも見られる。即ち、全体の排出量は制約値とともに減少しているが(太い実線)、そのときの一部の発電機からの排出量は必ずしも減少していない(ただし全体の運用費は増加する)。従って以上のことから系統内の発電機について、実際に制約を与える場合、制約を与える発電機を選択するときは、その効果を十分検討して決定する必要があることがわかる。

なお、これらの計算は北海道大学大型計算機センターのFACOM 230-75を使用した例では、使用語数は約17 kW, 計算時間は約23秒であった。本論ではダイナミックプログラミング法を用いたので計算時間は格子点の数( $Y_m^l$ の種類)により幾何級数的に変化する。従って計算時間を短くする必要のあるときは、具体的に必要な累積排出量制約を与えて、それに応じ



第4図 排出量制約に対する運用費

Fig. 4. Cost curve for constrained emissions.

- : すべての発電機について制約した場合
- - -: 1~8号機および13号機について制約した場合
- 太線: すべての発電機からの排出量
- 細線: 1~8号機および13号機からの排出量

て格子点の間隔, 個数を決定することにより計算時間, 使用語数の短縮, 縮少を計ることができる<sup>9)</sup>。

## 6. む す び

火力発電所の運用に伴い発生する NO<sub>x</sub> について累積排出量が規制された場合の最適運用パターンについて検討した。本手法を用いれば, 従来の燃料の軽質化, 浄化装置の改良によらなくても NO<sub>x</sub> の排出量が制御でき, また排出制約量に応じた最適運用パターンが決定できることを示した。また本手法をモデル系統に対し適用し, 全発電機が排出量制約を受ける場合と構成発電機中, 一部の発電機が排出量制約を受ける場合のそれぞれについて試算し結果を示して検討を加えた。なお, これらの計算は本学電子計算機室の OKITAC-4500 C および北海道大学大型計算機センターの FACOM 230-75 を用いて行った。

## 文 献

- 1) O. E. Finnigam and A. A. Fouad: Economic Dispatch with Pollution Constrains, IEEE, Winter Power Meeting, Jan. 1974.
- 2) M. R. Gent and J. W. Lamont: Minimum-Emission Dispatch, IEEE, PAS-Vol. 90, 1971.
- 3) 小池: 送配電工学 (養賢堂), 昭和 47.
- 4) 山城: 火力発電機群の起動停止問題の解法 (電気学会論文誌; Vol. 93-B, No. 9), 昭和 48 年 9 月.
- 5) 山城・中村: 火力発電機群の起動停止問題における起動優先順位に関する考察 (北見工大研報, 7 巻 1 号).
- 6) R. E. Bellman and S. E. Dreyfus: Applied Dynamic Programming (Princeton University Press) 1962.
- 7) J. K. Delson: Controlled Emission Dispatch, IEEE, PAS. Vol. 93, 1974.
- 8) J. B. Cadogan and L. Eisenberg: Environmental Control of Electric Power Systems, ISA, Trans. Vol. 14, 1975.
- 9) T. E. Bechert and N. Chen: Area Automatic Generation Control by Multi-Pass Dynamic Programming, IEEE, PAS, Vol. 96, 1977.
- 10) 荒木: 大気汚染の化学, 東京化学同人, 1975.
- 11) 公害—環境の科学, 毎日新聞社, 昭和 47 年.