

一次エネルギーの供給制約及び環境規制を 考慮した電力系統の最適運用計画 (第4報)*

——最小停止時間の制約を考慮する場合——

中 村 陽 一**

山 城 迪**

(昭和57年4月27日受理)

Optimum Operation Scheduling under Constrained Supply of a Primal Energy and Constrained Environmental Pollution (Part 4)

—in Case of Satisfying the Minimum Start-up Time—

by Yoichi NAKAMURA and Susumu YAMASHIRO

In the previous paper, we reported the optimum operation scheduling method which could satisfy the constraints of primal energy supply and NO_2 emission for every kind of energy and every area.

In this paper, our method is expanded to satisfy the minimum start-up time which is needed for a thermal unit when it starts-up again. Furthermore, our method is improved to reduce calculating error arising from our approximate method which ignored the upper and lower limits of outputs of generating units. The new calculating method is applied to the model system, and we show that the simple priority method can not give the optimum operating pattern. Finally, we show the appropriateness of our method by comparing our operating results with those of considering the nitrogen oxides removal systems.

1. ま え が き

火力発電所へ供給される一次エネルギー (燃料) がその種類ごとに供給量制約を受け、また、発電所がその立地点ごとに環境規制 (NO_2 累積排出量規制) を受けた場合の最適運用計画について前報¹⁾で述べた。本論では、火力発電所が再起動するときに必要な最小停止時間²⁾をも満足する最適運用計画について述べる。また、本手法の中で用いる近似手法のうち、発電機出力上下限制約を無視する部分について計算誤差がより小さくなるよう改良を加える。そし

* 昭和57年度電気学会全国大会で発表 (1982-4)

** 北見工業大学電気工学科

て、これらの計算手法をモデル系統に適用しその有効性を検討する。最後に、環境規制に対し脱硝装置を利用した場合と本手法を用いた場合の運転費を比較し、本手法の有効性を確認する。

2. 目的関数

考察期間を N 時間帯に分割し、系統は M 台の火力発電機で構成されているものとする。 I 種類の発電機グループを考え、それぞれの発電機グループは燃料供給量または累積 NO_2 排出量のいずれかの制約を受けているものとする。従って供給量と排出量の両方の制約を受ける発電機は 2 種類の発電機グループに属するものとする。

送電損失を無視し、(1) 式の目的関数を考える。

$$\phi = \mathbf{MFN} + (\mathbf{P} - \mathbf{MG})\lambda + \mu(\mathbf{Y} - \mathbf{DFN}) \quad (1)$$

ここで、

\mathbf{M} : M 次の行ベクトル。その要素はすべて 1 である。

\mathbf{F} : $(M \times N)$ のマトリックス。その要素 f_{mn} は (2) 式より得られる第 n 時間帯における m 号機の運転費である。

$$f_{mn} = \begin{cases} a_m + b_m \cdot g_{mn} + c_m \cdot g_{mn}^2 & (g_m \leq g_{mn} \leq \bar{g}_m) \\ fS_m & (g_{mn} = 0) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 a_m, b_m, c_m は発電機定数、 g_{mn} は出力、 g_m, \bar{g}_m は出力上下限制約、 fS_m は起動費²⁾ である。

\mathbf{N} : N 次の列ベクトル。その要素はすべて 1 である。

\mathbf{P} : N 次の行ベクトル。その要素 P_n は第 n 時間帯における系統負荷である。

\mathbf{G} : $(M \times N)$ のマトリックス。その要素 g_{mn} は第 n 時間帯における m 号機の出力である。

λ : N 次の列ベクトル。その要素 λ_n は第 n 時間帯の需給バランスに関するラグランジュ乗数である。

μ : I 次の行ベクトル。その要素 μ_i は i 種類目の制約 (すなわち、 i 番目の発電機グループが受ける供給量または排出量制約) に関するラグランジュ乗数である。

\mathbf{Y} : I 次の列ベクトル。その要素 y_i は i 種類目の制約に関する制約値である。

\mathbf{D} : $(I \times M)$ のマトリックス。その要素 d_{im} は、 i 種類目に制約される量 (すなわち消費量または排出量) を r_{mn} とすると (3) 式で表わすことができる発電機定数³⁾ である。

$$d_{im} = \begin{cases} r_{mn}/f_{mn} & (m \text{ 号機が } i \text{ 番目の発電機グループに属するとき}) \\ 0 & (m \text{ 号機が } i \text{ 番目の発電機グループに属さないとき}) \end{cases} \quad (3)$$

3. 火力発電機起動停止パターンの最適化

—発電機の解並列の効果の計算法—

火力発電機のある起動停止パターンのもとで(1)式を最小にすると、その起動停止パターンに対する最適運用(最適負荷配分)が得られる。本章では起動停止パターンの最適化手法について述べる。この最適化は発電機の解並列の効果、つまり解列または並列したときの運転費の減少量を用いて行う。すなわち、ある起動停止パターンについてこの効果を計算し、できるだけ効果の高い発電機を解並列して新たな起動停止パターンを得る。この計算をくり返し、最適な起動停止パターンを決定することにする。

3.1 解列の効果の算定法

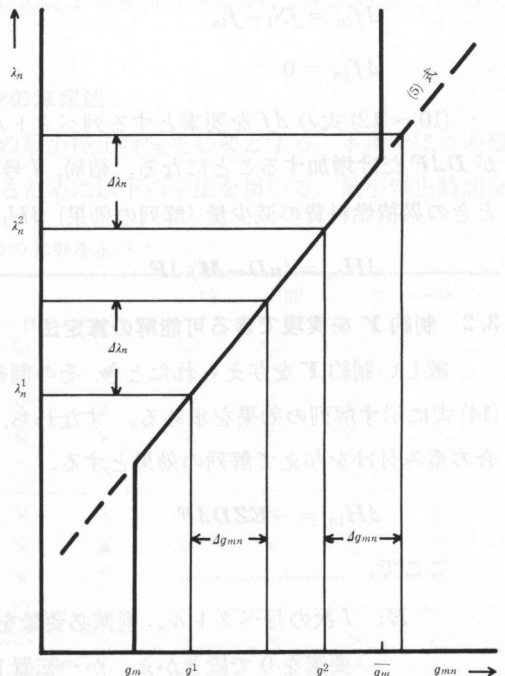
ある起動停止パターンのもとで(1)式を最小化したとき(4)式より(5)式または(6)式となる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial g_{mn}} = (1 - \sum_i \mu_i \cdot d_{im}) \cdot \frac{df_{mn}}{dg_{mn}} - \lambda_n = 0 \quad (4)$$

$$\lambda_n = (1 - \sum_i \mu_i \cdot d_{im}) \cdot (b_m + 2 \cdot c_m \cdot g_{mn}) \quad (5)$$

$$g_{mn} = \frac{1}{2 \cdot c_m} \cdot \left(\frac{\lambda_n}{1 - \sum_i \mu_i \cdot d_{im}} - b_m \right) \quad (6)$$

発電機の出力上下制限を満足する範囲で(5)式を考えるために、一般に第1図に示すように出力上下限点で λ_n が $\pm\infty$ に向う特性を考える。いま、ある起動停止パターンで(1)式を最小にしたとき、 m 号機の出力が第 n 時間帯で g^1 である場合を考える。第 n 時間帯の並列発電機群から l 号機を解列すると m 号機は出力を増加しなければならず、この増加量を Δg_{mn} とし、 λ_n の増加量を $\Delta \lambda_n$ とする。従って、この場合は m 号機の新たな出力が $g^1 + \Delta g_{mn}$ となる。しかし、(1)式を最小にしたとき出力が \bar{g}_m である場合は、 l 号機を解列しても一般に m 号機の出力は増加しない。このことから、 Δg_{mn} を計算する場合には出力が上限となっている発電機を除いて考えることにする。ただし、(1)式を最小にしたと



第1図 λ_n 特性

き出力が g_m 、または g^2 であるような場合は、 l 号機を解列しても必ずしも $g_m + \Delta g_{mn}$ 、または $g^2 + \Delta g_{mn}$ になるとは限らない。本論では計算時間を短縮する目的でこれらの発電機の出力は近似的に $g_m + \Delta g_{mn}$ 、 $g^2 + \Delta g_{mn}$ になると考え、解並列の効果を求めることにする (仮定 1)。また、起動停止パターンを多少変更しても (1) 式を最小にする μ はあまり変化しないものとする (仮定 2)。そこで、第 n 時間帯で並列している発電機群から、解列すると想定した発電機 (l 号機) と出力が上限になっている発電機の両方を除いた発電機群を u_n とする。(6) 式から m 号機の出力増加量 Δg_{mn} は (7) 式となり、需給バランスの面から (8) 式が得られ、(7)、(8) 式から $\Delta \lambda_n$ を消去すると (9) 式となる。

$$\Delta g_{mn} = \frac{\Delta \lambda_n}{2 \cdot c_m \cdot (1 - \sum_i \mu_i \cdot d_{im})} \quad (7)$$

$$g_{ln} = \sum_{m \in u_n} \Delta g_{mn} \quad (8)$$

$$\Delta g_{mn} = \frac{g_{ln}}{c_m \cdot (1 - \sum_i \mu_i \cdot d_{im}) \cdot \sum_{k \in u_n} \frac{1}{c_k \cdot (1 - \sum_i \mu_i \cdot d_{ik})}} \quad (9)$$

このとき、 m 号機 ($\in u_n$) の燃料費増加量 Δf_{mn} は (10) 式、解列する l 号機の燃料費増加量 Δf_{ln} は (11) 式、その他の発電機 (j 号機) の燃料費増加量は (12) 式となる。

$$\Delta f_{mn} = \Delta g_{mn} \cdot b_m + \Delta g_{mn} \cdot c_m \cdot (2 \cdot g_{mn} + \Delta g_{mn}) \quad (10)$$

$$\Delta f_{ln} = f S_l - f_{ln} \quad (11)$$

$$\Delta f_{jn} = 0 \quad (12)$$

(10)~(12) 式の Δf を要素とする列ベクトルを ΔF とすると、 l 号機の解列により各制約量が $D \Delta F$ だけ増加することになる。結局、 l 号機を解列し、かつ各制約量を $D \Delta F$ だけ減少したときの累積燃料費の減少量 (解列の効果) ΔH_{ln} は (13) 式となる¹⁾。

$$\Delta H_{ln} = (\mu D - M) \Delta F \quad (13)$$

3.2 制約 Y を実現できる可能解の算定法¹⁾

厳しい制約 Y を与えられたとき、その制約を実現できる起動停止パターンを求めるために (14) 式に示す解列の効果を求める。すなわち、解列したときの各制約量の減少量に削減必要割合の重み付けを与えて解列の効果とする。

$$\Delta H_{ln} = -E Z D \Delta F \quad (14)$$

ここで、

E : I 次の行ベクトル。削減必要量を表わし、 $DFN - Y$ で得られる列ベクトルの負の要素を 0 で置きかえ、かつ転置したベクトルである。

Z : $(I \times I)$ の対角行列。その要素 Z_{ii} の逆数は (15) 式により得られる列ベクトルの要

素である。

$$[1/Z_{ii}] = DFN \tag{15}$$

3.3 並列の効果の算定法

第 n 時間帯で l 号機を並列した場合の効果を考える。(1) 式を最小化したときの λ_n の値に対する l 号機の出力は (6) 式により得られる。第 1 図により出力を上下限制約の範囲で求めて、いまこの値を g_{ln} とする。第 n 時間帯の並列発電機群に l 号機を加え、かつ出力が下限になっている発電機を除いた集合を S_n とする。需給バランス制約は (16) 式となり (7), (16) 式から $\Delta\lambda_n$ を消去すると (17) 式となる。

$$g_{ln} = \sum_{m \in S_n} -\Delta g_{mn} \tag{16}$$

$$\Delta g_{mn} = \frac{-g_{ln}}{c_m \cdot (1 - \sum_i \mu_i \cdot d_{im}) \cdot \sum_{k \in S_n} \frac{1}{c_k \cdot (1 - \sum_l \mu_l \cdot d_{lk})}} \tag{17}$$

ここで、出力が上限または下限の近傍になっている発電機も S_n に含め、(17) 式を適用するのは (仮定 1) の考えによるためである。このとき、各燃料費増加量は (17) 式の Δg_{mn} を用いて (10), (12) 式から得られる。ただし、並列する l 号機の燃料費増加量 Δf_{ln} は次の (11) 式となる。

$$\Delta f_{ln} = a_l + b_l \cdot (g_{ln} + \Delta g_{ln}) + c_l \cdot (g_{ln} + \Delta g_{ln})^2 - f S_l \tag{11'}$$

これらの Δf を要素とする ΔF を用いて (13) 式により並列の効果 ΔH_{ln} を求めることができる。

3.4 最小停止時間を満足する起動停止パターンの算定法

火力発電機が再起動するためにはある一定の最小停止時間を必要とする。本論ではこの最小停止時間を満足する起動停止パターンを求めるために以下の手法を用いる。最小停止時間を

第 1 表 $T=3$ の場合の起動停止パターン

		時 間 帯 →									
解列する 場合	①	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	②	○	○	○	▼	○	○	○	○	○	○
	③	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○
	④	○	○	×	×	×	×	○	○	○	○
	⑤	○	○	○	×	×	×	×	○	○	○
並列する 場合	⑥	○	○	×	×	×	×	×	○	○	○
	⑦	○	○	×	×	▲	×	×	○	○	○
	⑧	○	×	×	×	○	.....	.....	.....	.....	.....
	⑨	○	○	○	○	○	.....	.....	.....	.....	.....
	⑩	.....	.....	.....	.....	○	×	×	×	○	○
	⑪	.....	.....	.....	.....	○	○	○	○	○	○

○：並列，×：解列

時間帯数に換算した値を T とする。例として $T=3$ の発電機について考える。第1表の①のように発電機が並列し続けているパターンにおいて、②に▼で示す時間帯で解列する場合を考える。▼で解列し、 $T=3$ を満足するパターンとして③～⑤の3種類を考える。これらのパターンにおいて、解列している期間中の ΔH_{ln} をそれぞれ合計してそれらを解列の効果とする。また、並列する場合については、⑥に示すパターンにおいて⑦の▲で並列する場合を考える。このとき、▲の前半と後半に分け▲で並列し $T=3$ を満足するパターンとして⑧、⑨および⑩、⑪を考える。これらのパターンにおいて、パターンの変更部分の ΔH_{ln} を合計し前半、後半のそれぞれを組み合わせて新たな起動停止パターンとする。結局、解列する場合は最大 T 種類、並列する場合は前半、後半の組み合わせで最大4種類のパターンを考えることになる。なお、第1時間帯にはピーク負荷を選びすべての発電機が並列するものとする。

3.5 新たな起動停止パターンの算定法

$(M \times N)$ 個の ΔH_{ln} 、または第1表に示した各パターンの変更部分の ΔH_{ln} の合計の中から最大値を求めこれを $\overline{\Delta H}$ とする。(9)式、(17)式の Δg_{mn} は(仮定1)、(仮定2)のもとで得られた近似的な値であることから、ある余裕 $\varepsilon (\geq 0)$ を設け次の不等式を考える。

$$\Delta H_{ln} \geq \begin{cases} \overline{\Delta H} - \varepsilon & (\overline{\Delta H} \geq 0) \\ -\varepsilon & (\overline{\Delta H} < 0) \end{cases} \quad (18)$$

(18)式を満足する発電機を解列、または並列し新たな起動停止パターンとする。つまり、近似解 $(\overline{\Delta H})$ から ε の範囲に入る起動停止パターンをすべて考えることにする。なお、(18)式において最小停止時間の制約により l 号機が第 n 時間帯で解列、または並列不可能な場合は左辺は第1表に示した各パターンの変更部分の ΔH_{ln} の合計とする。そして、この合計が(18)式を満足する場合は該当するパターンを新たな起動停止パターンとする。また、 ε の具体的な値は計算に利用する計算機システムの処理速度、記憶容量等を考慮して決定すべき値となる。

3.6 本手法による計算手順

本手法の計算手順を示すと次のようになる。

- Step 1: 初期起動停止パターンを設定する。
- Step 2: 与えられた起動停止パターンにより(1)式を最小化する。
- Step 3: 第 n 時間帯で l 号機が並列している場合は(9)式の Δg_{nm} を用いて、解列している場合は(17)式の Δg_{mn} を用いて ΔF を計算する。
- Step 4: 制約 Y を満足できている場合は(13)式を用いて、満足できていない場合は(14)式を用いて ΔH_{ln} を計算する。
- Step 5: (18)式により新たな起動停止パターンを求める。
- Step 6: Step 5 で得られたすべての起動停止パターンについて(1)式の最小化計算が行われていれば計算終了。未計算の起動停止パターンが残っていれば Step 2 へ。

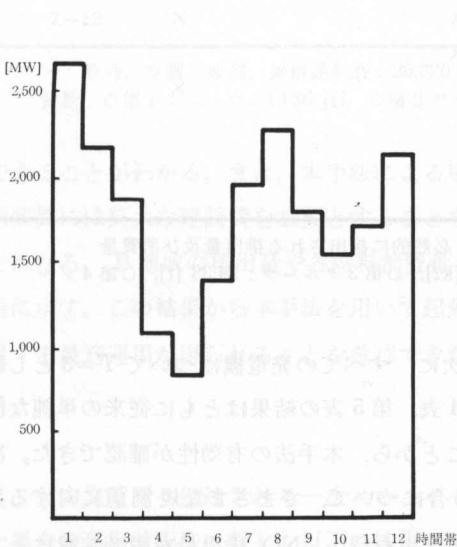
4. モデル系統による計算例

第2表に特性を示す12台の発電機からなる系統へ第2図に示す負荷曲線を与えた場合について試算した。燃料消費量, NO₂ 排出量特性を示す D マトリックスと制約の種類を第3表に示す。最初に, すべての発電機について $T=0$ とし Y の要素を充分大きく与え, $\varepsilon=0.5$ とし

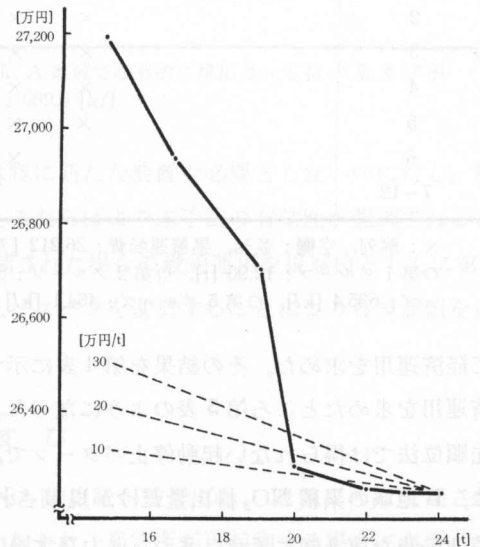
第2表 発電機定数

発電機 No.	$f=a+bg+cg^2$ [千円/時]			g	\bar{g}	起 動 費 [千円/時]
	a	b	$c \times 1000$	[MW]	[MW]	
1	56.132	5.598	0.216	27	101	2.0
2	45.626	5.009	6.269	27	101	2.2
3	53.454	5.507	0.083	37	232	3.9
4	61.538	4.782	5.668	27	99	4.6
5	85.573	4.813	2.543	37	222	4.6
6	36.923	5.491	0.221	27	99	4.6
7	54.530	4.454	0.340	37	220	3.9
8	61.281	4.686	0.472	37	236	5.2
9	184.760	6.225	1.811	144	344	—
10	184.760	6.225	1.811	144	344	—
11	151.719	5.471	1.170	144	344	—
12	151.719	5.471	1.170	144	344	—

注) 9~12号機はベース火力として常に系統へ並列する。



第2図 負荷曲線



第3図 NO₂ 排出量規制に対する累積運転費

実線: 本手法による場合

点線: 脱硝装置による場合

第3表 Dマトリックス

立地点	A 地域		B 地域		
発電機グループ	1	2	3	4	5
約制の種類	NO ₂ 排出量	重油消費量	NO ₂ 排出量	重油消費量	LNG消費量
発電機 No.	[kg/千円]	[l/千円]	[kg/千円]	[l/千円]	[l/千円]
1	0	0	0.400	0	9.82
2	0	0	0.401	0	9.66
3	0.107	6.00	0	0	0
4	0	0	0.122	0	13.23
5	0	0	0.111	6.25	0
6	0	0	0.121	0	13.56
7	0.105	6.14	0	0	0
8	0	0	0.118	5.95	0
9	0.130	5.77	0	0	0
10	0.130	5.83	0	0	0
11	0	0	0.147	4.92	0
12	0	0	0.147	5.12	0

第4表 経済運用 (T=0)

発電機	時 間 帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1				×	×	×			×	×	×	
2				×	×	×				×		
3				×	×	×						
4				×	×					×		
5				×	×							
6					×							
7~12												

×：解列，空欄：並列，累積運転費：26,212 [万円]，必然的に排出される排出量及び消費量

○第1グループ：12.90 [t]，○第2グループ：641.6 [kl]，○第3グループ：24.33 [t]，○第4グループ：635.4 [kl]，○第5グループ：454.1 [kl]

て経済運用を求めた。その結果を第4表に示す。次に，すべての発電機について $T=3$ とし経済運用を求めたところ第5表のようになった。第4表，第5表の結果はともに従来の単純な優先順位法では得られない起動停止パターンであることから，本手法の有効性が確認できた。次に，B地域の累積NO₂排出量だけが規制された場合について，さまざまな規制値に対する累積運転費を第3図に示す。また，火力発電機は経済運用を行い，NO₂排出量を脱硝装置により処理した場合の累積運転費を第3図に点線で示す。なお，脱硝装置の単位脱硝量当りの運転費は一定であると仮定した。第3図から，ある程度の規制値までは本手法を適用した方が経済的

第5表 経済運用 (T=3)

発電機	時間帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1				×	×	×			×	×	×	
2				×	×	×			×	×	×	
3				×	×	×						
4				×	×	×						
5												
6			×	×	×							
7~12												

×：解列，空欄：並列，累積運転費：26,235 [万円]，必然的に排出される排出量及び消費量
 ○第1グループ：12.85 [t]，○第2グループ：638.9 [kJ]，○第3グループ：24.04 [t]，○第4グループ：656.8 [kJ]，○第5グループ：415.5 [kJ]

第6表 $Y_3=22.1, Y_4=630, Y_5=375$ の制約に対する最適運用

発電機	時間帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2				×	×	×			×	×	×	
3												
4				×	×	×						
5				×	×	×		×	×	×		
6				×	×	×						
7~12												

×：解列，空欄：並列，累積運転費：26,320 [万円]，A地域で必然的に排出される排出量及び消費量
 ○第1グループ：13.86 [t]，○第2グループ：689.0 [kJ]

であることがわかる。また，本手法による場合は特に新たな装置を必要としないのに対し，脱硝装置には莫大な建設費を必要とすることを考えるならばより本手法の有効性が強調されることになる。B地域の排出量や各燃料消費量が規制された場合の最適運用を規制値とともに第6表に示す。この結果から本手法を用いて起動停止パターンを変更することにより各規制値を満足する最適運用が得られることを確認できた。

5. むすび

火力発電所へ供給される一次エネルギーとNO₂排出量が種類ごと，地域ごとに規制された場合の運用計画法に対し，以下の拡張，改良を加えた。発電所が再起動する場合に必要とする最小停止時間を満足する最適運用計画法を開発した。本手法の有効性を，モデルシステムの試算結果が優先順位法では得られない結果であることから明らかにした。前報で述べた近似解法に

について、より計算誤差が小さくなるよう改良を加えた。また、 NO_2 排出量について脱硝装置を利用した場合と比較し本手法の有効性を示した。なお、モデル系統の試算には本学電気工学科データ処理室の HITAC 10 II, および北海道大学大型計算機センターの M 200 H を利用した。本研究は昭和 56 年度文部省科学研究費補助金（一般研究 C）の交付を受けて行ったものである。

最後に、貴重な資料を提供していただいた北海道電力株式会社工務部給電課長伊東仁氏に深く感謝申し上げます。また、終始貴重な御指導を下さった北見工業大学学長小池東一郎博士に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 中村, 山城 “一次エネルギーの供給制約及び環境規制を考慮した電力系統の最適運用計画 (第 3 報)”, 北見工業大学研究報告, 投稿中.
- 2) 山城 “火力発電機の起動停止問題の一解法”, 電気学会論文誌 B 分冊, Vol. 93, No. 9, p. 391-398 (昭和 48 年 9 月).
- 3) J. B. Cadogan and L. Eisenberg “Environmental Control of Electric Power System”. ISA, Transactions 14 (1975).
- 4) 中村, 山城, 小池 “一次エネルギーの供給制約及び環境規制を考慮した電力系統の最適運用法” 電気学会電力技術研究会, PE-81-22, p. 41-50 (昭和 56 年 7 月).