

# 火力発電所復水器細管の最適取替†

西谷隆義\*      木村正行\*      本多波雄\*  
滝島紀\*\*      岡崎三郎\*\*  
菊地金也\*\*\*

## 1. はしがき

復水器は火力発電所にとり極めて重要な機器であり、運転中に復水器細管が破損し、冷却水（海水）が漏入するとボイラに悪影響をおよぼすので、できるだけ早く減負荷あるいは運転を停止して修理しなければならない。

現在、復水器細管の漏洩事故の防止には、種々の対策（防蝕塗装、電気防蝕、塩素処理等）が考えられている。しかしこれらの対策は補助的な場合が多く、一定期間毎に、ある基準にしたがって一部の復水器細管を新管に取替えて対処しているのが実状のようである。その際、発電に文障を与える漏洩事故は、勿論ない方がよいが、むやみに新管に取替えて多額の費用を支出するのむだなわけである。

本論文は、復水器細管の取替が細管の腐蝕の度合を示すエディオグラフの振巾に基づいて行なわれる場合の最適取替方式を与えようとするものである。本文では、まず、若干の仮定のもとに上記の取替問題を解析して定式化を行ない、最適取替方式を与えた。ついで本方式を仙台火力発電所の復水器細管の取替えに適用する場合について、具体的資料に基づいた最適取替方式の検討とその結果を示した。

## 2. 問題の解析

### 2・1 復水器保守状況

仙台火力発電所の175MWユニット3台について、運開以来の復水器保守状況を種々の角度から調査した。その主なものは復水器事故状況、復水器細管取替状況および防蝕塗料の使用状況などである。その結果、次の事項が明らかになった。

---

† 1968年7月24日受理

\* 東北大学電気通信研究所

\*\* 東北電力株式会社

\*\*\* 東北学院大学工学部

- (i) 漏洩（故障）管の位置的分布には偏りが認められない。
- (ii) インレットアタックやデポジットアタックによる腐蝕の位置的分布には偏りが認められない。
- (iii) デポジットアタックは偶発的なものであり、またこのために交換される管数はインレットアタックが原因で交換されるものの3～7%である。
- (iv) インレットアタックに対する防蝕塗装については、現在試験段階であり、定量的な評価が困難である。
- (v) エディオグラフ（渦流探傷器）の振巾はインレットアタックによる腐蝕の度合を示す尺度に用いることができる。

## 2・2 解析に用いた仮定

復水器細管の取替問題の解析を容易にするために次の仮定をおく。

- (1) 復水器細管はある一定期間毎に検査が行なわれ、取替基準を越えたものはすべて取替えられる。またそれまでに故障したものはその度毎に盲打ちが行なわれ、検査のときに取替えられる。
- (2) 1取替周期内で故障する復水器細管の数は少なく、それによる復水器の機能の低下は無視できる。
- (3) 復水器細管は2本以上同時に故障することはない。
- (4) 最適取替の対象を、インレットアタックによる腐蝕のため取替えられる復水器細管のみに限定する。
- (5) インレットアタックに対する防蝕塗装は行なわないものとする。
- (6) 取替基準をエディオグラフの振巾におく。
- (7) インレットアタックによる腐蝕の度合には位置的偏りが無い。
- (8) インレットアタックによる腐蝕の進行状況は現在の腐蝕の度合（エディオグラフの振巾）にのみ依存し、以前の履歴には関係しない。

上記の(1)～(3)は実際の保守状況からみて自然な仮定である。仮定(4)、(5)、(6)はそれぞれ2・1節の(iii)、(iv)、(v)に、また(7)は(i)および(ii)に基づいている。仮定の(8)は、実際にもほぼ成りたつと考えられる。それはインレットアタックによる腐蝕は復水器細管の入口で流水が乱れることに起因するところから、現在よりまえの腐蝕の状態が以後の腐蝕の進行状況におよぼす影響は無規しう程度のものである。ただし、デポジットアタックによる腐蝕の場合には仮定(8)は成立しない。それは、デポジットアタックの場合には稀に混入する貝殻等の破片による損傷に起因するもので損傷の状態は著るしく異なり、エディオグラフの振巾は同じでもはじめの損傷の状態によってそれぞれ異なる経過をたどるからである。）

### 2・3 期待費用

復水器細管は、ある一定期間毎に検査取替えが行なわれる。いまこの期間を  $t$  とし、期間のはじめにおける復水器細管全体の状態をベクトル  $\pi^0$  で表わす (2・4参照)。すると、この期間の終りに取替基準  $S$  (2・5参照) に基づき検査取替えが行なわれたときの期待費用  $K$  は次のように表わされる。〔1〕, 〔4〕。

$$(1) K(\pi^0, t, S) = C_1 Y(\pi, t, S) + C_2 Z(\pi^0, t, S) + C_3$$

ただし

$K(\pi^0, t, S)$  : 初期状態  $\pi^0$ , 取替基準  $S$  のときの期間  $t$  における期待費用。

$C_1$  : 検査取替のときの1本当りの費用。

$Y(\pi^0, t, S)$  : 期間  $t$  の終りの検査取替において取替基準  $S$  によって取替えられる平均本数。

ただし期間  $t$  の間に故障し盲打ちされたものも含む。

$C_2$  : 盲打ち1回 (1本) 当りの費用。

$Z(\pi^0, t, S)$  : 期間  $t$  における平均故障本数。

$C_3$  : 検査取替のときの固定費用。

### 2・4 状態ベクトルと遷移確率行列

故障していない復水器細管については、その腐蝕の度合を示すエディオグラフの振巾  $a$  を  $N$  個の区間に分割し、

(2)  $a_0 = 0 \leq a < a_1, a_1 \leq a < a_2, \dots, a_{N-1} \leq a$  とおく。このとき、 $a$  が第  $i$  番目の区間 ( $a_{i-1} \leq a < a_i$ ) に入るものを状態  $i$  にあるといい、故障している (盲打ちされている) ものは状態  $N+1$  にあるという。復水器細管の総数を  $M$ , 時刻  $\tau$  において、状態  $i$  にある本数を  $\pi^{\tau}_i$  で表わせば、

$$(3) M = \sum_{i=1}^{N+1} \pi^{\tau}_i,$$

状態ベクトル  $\pi^{\tau}$  を、次のように定義する。

$$(4) \pi^{\tau} = (\pi^{\tau}_1 \pi^{\tau}_2 \dots \pi^{\tau}_i \dots \pi^{\tau}_{N+1})$$

$M$  個の復水器管の状態は、時間の経過に伴なって変化する。期間  $t$  のはじめに状態  $i$  にあったものが、期間  $t$  の終りに状態  $j$  に遷移する確率を  $P_{ij}$  で表わす。腐蝕の度合は以前の値より小さくなることはないから

$$(5) P_{ij} = 0, i > j, i, j = 1 \sim N.$$

また、一たん故障したものは、以後故障の状態を保つから

$$(6) P_{N+1, N+1} = 1$$

$P_{ij}$  を要素とする復水器細管の遷移確率行列を  $P$  で表わす。すると、期間  $t$  のはじめの状態は  $\pi^0$  であるから、期間  $t$  の終りの状態  $\pi^t$  は、

$$(7) \quad \pi^t = \pi^0 P = (\pi^t_1 \pi^t_2 \cdots \pi^t_{N+1})$$

遷移確率行列  $P$  の第  $i$  列の列ベクトル  $P_i$  で表わせば、

$$(8) \quad P = (P_1 P_2 \cdots P_i \cdots P_{N+1})$$

## 2.5 平均の取替本数および故障本数.

取替基準  $S$  が  $S=i$  と定められたときには式(2)においてエディオグラフの振巾  $a$  が

$$(9) \quad a \geq a_i$$

を満足するもの、すなわち状態が  $(i+1)$  以上のものは、すべて取替えられる。一般に  $S$  は、 $0, 1, 2, \dots, N$  の値をとりうる。ただし、 $S=N$  のときは、故障しているもののみを取替えることになる。取替基準を  $S$  として、期間  $t$  の終りに検査取替を行なうものとする、平均取替本数  $Y$  は式(7)および(8)より次のようになる。

$$(10) \quad Y(\pi^0, t, S) = \sum_{j=S+1}^N \pi^0 P_j + \pi^0 P_{N+1} = \sum_{j=S+1}^N \pi^t_j + \pi^t_{N+1}$$

ただし

$$(11) \quad \pi^0 P_j = \sum_{i=1}^{N+1} \pi^0_i P_{ij}$$

式(10)の右辺の第1項は、エディオグラフの振巾が  $a_s$  以上になったために取替えられる平均本数、第2項は、期間  $t$  の間に故障したために取替えられる平均本数  $Z$  である。

## 2.6 定常状態

初期状態ベクトルを  $\pi^0$ 、取替基準を  $S$  とし、一定周期で検査取替が行なわれるものとする。

いま第1回の取替直後の状態ベクトルを  $\hat{\pi}^t$  で表わす。

$$(12) \quad \hat{\pi}^t = (\hat{\pi}^t_1, \hat{\pi}^t_2, \dots, \hat{\pi}^t_S, \dots, \hat{\pi}^t_{N+1})$$

新管に取替えられる本数は、式(10)で与えられ、新管はすべて状態1に属する。よって

$$(13) \quad \hat{\pi}^t_1 = \pi_1 + Y(\pi^0, t, S)$$

$$= \pi^0 (P_1 + \sum_{j=S+1}^{N+1} P_j)$$

状態  $2 \sim S$  は、取替直前と直後では変らない。また、状態  $S+1 \sim N+1$  に属する本数は、取替により零となる。よって

$$(14) \quad \begin{cases} \hat{\pi}^t_j = \pi^t_j & (j=2 \sim S) \\ \hat{\pi}^t_i = 0 & (i=S+1 \sim N+1) \end{cases}$$

ゆえに、初期状態ベクトル  $\pi^0$  から第1回の取替直後の状態ベクトル  $\hat{\pi}^t$  への遷移は、式(13)、(14)より、

$$(15) \quad \hat{\pi}^t = \pi^0 P$$

で与えられる。ただし

$$(16) \begin{cases} \hat{P} = (\hat{P}_1, \hat{P}_2, \dots, \hat{P}_S, \dots, \hat{P}_{N+1}) \\ \hat{P}_1 = P_1 + \sum_{j=S+1}^{N+1} P_j, \quad \hat{P}_j = P_j, \quad (j=2 \sim S) \\ \hat{P}_j = 0, \quad (j=S+1 \sim N+1) \end{cases}$$

ここで0は零列ベクトルである。

$\hat{P}$  を  $n$  回かけ合せたものを  $\hat{P}^n$  とおくと、第  $n+1$  回目の取替直後の状態ベクトル  $\pi^{(n+1)t}$  は

$$(17) \hat{\pi}^{(n+1)t} = \hat{\pi}^n \hat{P} = \pi^0 \hat{P}^{(n+1)}.$$

遷移確率行列は、 $n \rightarrow \infty$  である確率行列に収束することが知られている。したがって、

$$(18) \lim_{n \rightarrow \infty} \hat{P}^n = \hat{P}^\infty, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \hat{\pi}^n = \hat{\pi}^\infty$$

とおけば、定常状態 ( $n \rightarrow \infty$ ) では、

$$(19) \hat{\pi}^\infty = \hat{\pi}^\infty \hat{P} = \hat{\pi}^\infty \hat{P}^\infty$$

ここで考察している取替過程は完全エルゴード的であるから定常状態は初期状態に依存しない [3] したがって、 $\hat{\pi}^\infty$ 、 $\hat{P}^\infty$  は取替周期  $t$  および取替基準  $S$  のみの関数となる。

### 3. 問題の定式化

復水器細管の取替問題の定式化を次の(A)、(B)の2つに分けて示す。いずれも定常状態を仮定している。

(A) 与えられた取替周期のもとで最適取替基準を求める場合

検査取替の時期が、火力発電機の定期点検等によって定められている場合には、最適取替基準  $S$  のみを求める問題となる。したがって、 $\hat{\pi}^\infty = \hat{\pi}^\infty(S)$ 、 $\hat{P}^\infty = \hat{P}^\infty(S)$  とおくと、

$$(20) \hat{\pi}^\infty(S) = \hat{\pi}^\infty(S) \hat{P}^\infty(S)$$

すると、定常状態での1取替周期の期待費用  $K(\pi^\infty(S))$  は、

$$(21) K(\hat{\pi}^\infty(S)) = C_1 Y(\hat{\pi}^\infty(S)) + C_2 \hat{\pi}^\infty(S) P_{N+1}$$

ここに、 $Y(\hat{\pi}^\infty(S))$  は、(10)で  $\pi^0$  の代りに  $\hat{\pi}^\infty(S)$  とおけばえられる。よって、

$$(22) K(\hat{\pi}^\infty(S)) = \hat{\pi}^\infty(S) \left\{ C_1 \sum_{j=S+1}^{N+1} P_j + C_2 P_{N+1} \right\}$$

いま、最適取替基準を  $\hat{S}$  で表わすと、

$$(23) \begin{cases} K(\hat{\pi}^\infty(\hat{S}+1)) - K(\hat{\pi}^\infty(\hat{S})) > 0 \\ K(\hat{\pi}^\infty(\hat{S}-1)) - K(\hat{\pi}^\infty(\hat{S})) > 0 \end{cases}$$

がなりたつ。 $S$  を求める言算法については 4・2 に示す。

(B) 与えられた取替基準のもとで最適な取替周期を求める場合

取替周期  $t$  のときの定常状態における取替直後の状態を、 $\hat{\pi}^\infty(t)$  で表わす。最適な取替周期を  $\hat{t}$  とすれば、定常状態では次の条件がなりたつ。

$$(24) \frac{K(\hat{\pi}^\infty(\hat{t}+1))}{\hat{t}+1} - \frac{K(\hat{\pi}^\infty(\hat{t}))}{\hat{t}} > 0$$

$$(25) \frac{K(\hat{\pi}^\infty(\hat{t}-1))}{\hat{t}-1} - \frac{K(\hat{\pi}^\infty(\hat{t}))}{\hat{t}} > 0$$

ただし、1周期当りの期待費用  $K(\hat{n}^\infty(\hat{t}))$  は取替時の固定費用  $C_3$  を含み次式で与えられる。

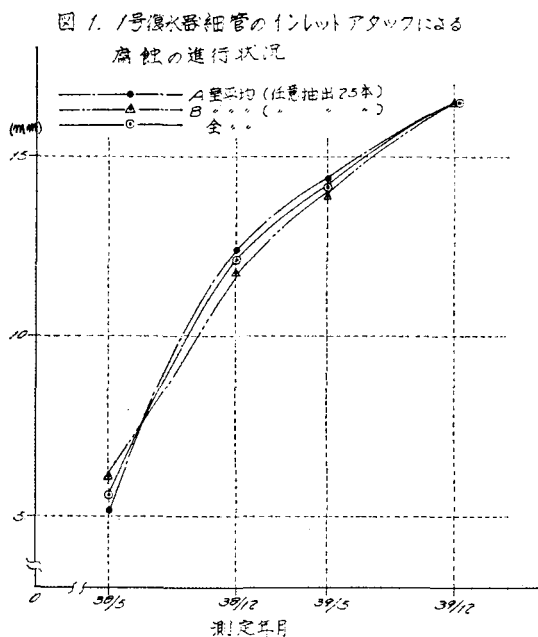
$$(25) \quad K(\hat{n}^\infty(\hat{t})) = \hat{n}^\infty(\hat{t}) \left\{ C_1 \sum_{j=S+1}^{N+1} P'_j + C_2 P'_{N+1} \right\} + C_3$$

ここに  $P'_j$  は定常状態において期間  $\hat{t}$  のはじめの状態から、期間  $\hat{t}$  末での取替直前の状態への遷移確率行列の第  $j$  列を表わす列ベクトルとする。式 (24), (25) より最適取替周期  $t$  が得られる。

以上復水器細管の取替問題の定式化について述べた。最適取替基準と最適取替周期の2つを決定する場合の計算法としては、例えば弛緩法を用いることができる。すなわち (A) において  $\hat{S}_1$  を求め、次に (B) において  $S$  を  $\hat{S}_1$  に固定して  $\hat{t}_1$  を求める。さらに、(A) において  $t$  を  $\hat{t}_1$  に固定して  $\hat{S}_2$  を求める。以下同様にして、 $(\hat{S}_2, \hat{t}_2)$ ,  $(\hat{S}_3, \hat{t}_3)$ , ……を求める。このとき、期待費用  $K$  が取替周期  $t$  および取替基準  $S$  に関して凹 (下に凸) な関数ならば、 $(\hat{S}_n, \hat{t}_n)$ ,  $n=1, 2, \dots$  は最適値に収束する [2]。

#### 4. 応用例

##### 4.1 状態遷移確率行列



1号復水器細管の腐蝕の進行を測定した記録から、復水器のA, B各室毎にランダムに25本ずつ抽出し、そのエディオグラフの振巾の平均値をグラフに示したのが図1である。図から復水器のA室, B室による差はなく、したがって、インレットアタックによる腐蝕の位置的偏りは殆んど認められない。

図2はエディオグラフの振巾とその振巾に対応した細管の本数が時間の経過とともに変化する様子を示したものである。表1は1年6カ月の期間についてのインレットアタックの進行状況を

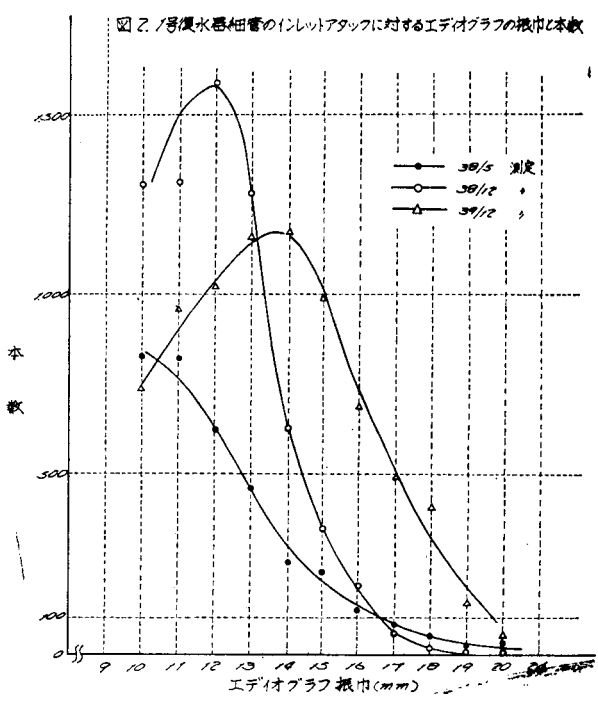


表1. 1号復水器細管インレットアタックによる腐蝕の進行状況

(期間 38/5 ~ 39/12)

39/12 振巾 (mm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	合計 本数
0	177	462	899	815	660	169	75	51	89	94	126	161	253	249	288	247	211	186	180	62	15	1	0	0	0	0	0	1,524
1		33	77	250	45	23	23	26	29	38	50	70	79	100	89	81	70	66	52	12	3	1	0	0	0	0	0	1,205
2			120	86	52	30	19	23	32	50	75	94	130	109	110	99	53	24	18	9	3	1	0	0	0	0	0	1,213
3				72	58	26	20	16	25	53	51	81	86	89	91	82	52	36	24	15	6	2	0	0	0	0	0	983
4					112	35	23	18	17	19	39	37	60	60	68	56	38	21	10	5	3	2	0	0	0	0	0	643
5						70	20	23	19	24	47	63	54	77	53	41	26	15	6	3	2	2	0	0	0	0	0	545
6							38	25	34	28	30	46	36	33	40	25	16	11	7	4	2	1	0	0	0	0	0	376
7								58	41	41	47	51	40	54	40	35	22	13	6	3	2	2	1	0	0	0	0	466
8									83	60	73	54	60	62	62	34	29	19	10	5	4	3	1	0	0	0	0	521
9										106	71	78	55	35	45	25	15	8	3	2	2	1	1	0	0	0	0	647
10											136	72	83	93	60	40	26	16	9	5	3	2	2	1	0	0	0	548
11												109	80	97	87	59	38	26	13	6	3	2	2	1	0	0	0	523
12													79	64	72	67	41	22	11	5	2	1	1	0	0	0	0	366
13														21	54	53	41	16	8	4	2	1	1	0	0	0	0	262
14																												
15																												
16																												
17																												
合計本数	177	463	1,166	1,223	777	548	218	240	369	513	747	944	1,071	1,103	1,115	704	600	459	365	100	52	22	9	4	0	0	0	13,307

示したものである。表1は、縦に昭和38年5月に測定したエディオグラフの振巾がとってあり、右端にその振巾に対応した本数が記入されている。縦と横のエディオグラフの振巾の交点の数字、例えば縦2、横3の交点の数字86は38年5月にエディオグラフの振巾が2mmであった本数(1,213本)のうち39年12月に振巾が3mmになった本数を表わしている。状態遷移確率行列は表1に基づいて作成された。行列の次数はエディオグラフの振巾を考慮し、25×25と定めた。しか

し、昭和39年12月の時点では取替基準が16mmであったため、16mm以上については、その遷移確率を15mmまでの実績をもとに推定し、遷移確率行列を作った。過去の測定資料から、期間が1年の場合の遷移確率行列も求めたが、紙面の関係から、ここでは取替周期を1年半とした場合についてのみ考察を行なう。表2は前述のようにして作成した期間1年半の状態遷移確率行列である。

表 2. 1号復水器細管の状態遷移確率表

状態 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1	3.36	2.70	1.68	1.12	0.72	0.48	0.32	0.24	0.16	0.11	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
2	0	2.70	1.68	1.12	0.72	0.48	0.32	0.24	0.16	0.11	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
3	0	0	1.68	1.12	0.72	0.48	0.32	0.24	0.16	0.11	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
4	0	0	0	1.12	0.72	0.48	0.32	0.24	0.16	0.11	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
5	0	0	0	0	0.72	0.48	0.32	0.24	0.16	0.11	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
6	0	0	0	0	0	0.48	0.32	0.24	0.16	0.11	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
7	0	0	0	0	0	0	0.32	0.24	0.16	0.11	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
8	0	0	0	0	0	0	0	0.24	0.16	0.11	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0.16	0.11	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01

注：この表は期間が39/5~39/12の1年半のものである。単位は%。  
 i: 39/5の状態, j: 39/12の状態 (エドワーズの振動数が (i-1) ≤ a < i の時  
 復水器細管は状態iにあるという)

4・2 費用定数

(1) C<sub>1</sub>: 検査取替えのときの1本当りの平均の費用。

C<sub>1</sub> = 新管購入費 - 旧管庫入費 + 工費  
 = 4,390 - 1,029 + 328 = 5,747円/本

C<sub>2</sub>: 1回の故障(仮定より、故障1回当たり1本である)による損失



$C_3$  = 販売電力量低下に伴う損失 ( $y_1$ ) + 缶水ブロー損 ( $y_2$ ) + 薬注代 ( $y_3$ ) + 盲打費 ( $y_4$ )

$y_1$  は次の2つの場合に分けられる.

電力損失のない場合  $y_1 = 0$ 円/回

電力損失のある場合  $y_1 = 85,000$ 円/回

$y_2$  = 純水損 + 熱損失

$$= 13,959 + 71,868 = 85,827 \text{円/回}$$

$y_3 = 195$ 円/回

$y_4 = 9,450$ 円/回

$C_2 = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 = y_1 + 95,472$ 円/回

電力損失のない場合  $C_2 = 95,472$ 円/回

電力損失のある場合  $C_2 = 180,472$ 円/回

$C_3$  : 細管交換時の固定費

$C_3 = 257,000$ 円/回 (1,000本交換)

$$= 305,000 \text{円/回 (2,000本交換)}$$

ただし、復水器細管の取替はボイラ・タービンの定期検査時に行なわれるものとしたのでここでは最適取替基準のみを求めればよい。そのため  $C_3$  については考える必要はない。

#### 4.3 計算方法

最適取替基準  $S$  を求めるための具体的な計算方法を以下に示す。考察の便宜上、式(20)の両辺を総本数  $M$  で割って、

$$(27) \quad \hat{\pi}'^{\infty}(S) = \hat{\pi}'^{\infty}(S) \hat{P}(S)$$

$$(28) \quad \hat{\pi}'^{\infty}_1(S) + \hat{\pi}'^{\infty}_2(S) + \cdots + \hat{\pi}'^{\infty}_{N+1}(S) = 1$$

ここに  $\hat{\pi}'^{\infty}_i(S) = \hat{\pi}^{\infty}_i(S)/M$ ,  $\hat{\pi}'^{\infty}_i(S) = \hat{\pi}^{\infty}_i(S)/M$

$$\hat{\pi}'^{\infty}_{S+1} = \hat{\pi}'^{\infty}_{S+2} = \cdots = \hat{\pi}'^{\infty}_{N+1} = 0$$

1 取替周期の期待費用  $K(\hat{\pi}'^{\infty}(S))$  の計算が簡単なことと、最適取替基準からはづれた場合の期待費用の変化の状況を知っておくことが望ましいことから、次のような計算方法をとった。すなわち、 $S=14 \sim 23$  までのすべての点について、期待費用  $K(\hat{\pi}'^{\infty}(S))$  (=復水器細管1本当りの平均費用) を計算し、その中の最小値を与える  $S(=\hat{S})$  を求めた。その計算手順は図3に示す通りである。ただし、復水器細管のエディオグラフの振巾がどこまで大きくなると故障するかという事は確定的にはきめられないので、本計算では便宜上、破損点なる考えを導入した。すなわち、復水器細管が1周期末の取替直前にインデックスが  $b$  以上の状態に属するものはすべて次の取替周期内に故障すると見做すこととし、 $b$  を破損点と呼ぶことにした例えば、 $b=21$  とすると、インデックスが21以上である状態に属するものはすべて取替えられることになる。本計算では  $b$  の値を1つの  $S$  に対して、 $b=21 \sim 25$  まで変化させて期待費用の変化を調べた。

#### 4.3 計算結果と考察

図 3. 取替基準を  $S$  ( $S=14 \sim 23$ ), 破損度を  $b$  ( $b=21 \sim 25$ ) としたときの覆水器細管 1 本当たりの期待費用  $b'$  を求める流れ図

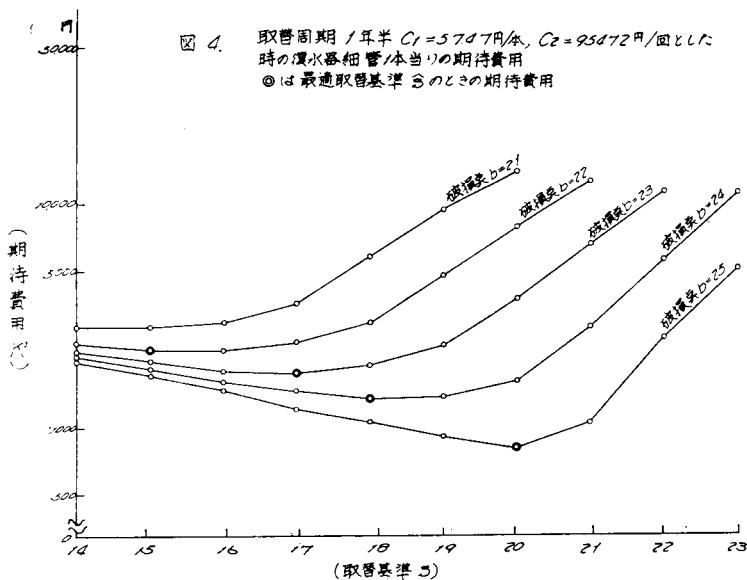
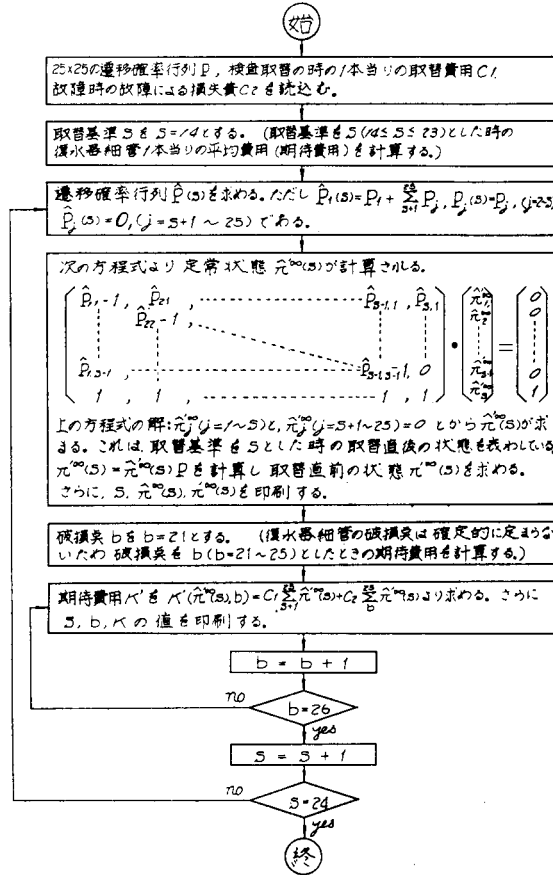


図4, 図5に取替周期を1年半としたときの取替基準 $S$ および破損点 $b$ と期待費用 $K(\hat{\infty}(S), b)$ との関係を示した. この期待費用に総本数 $M$ をかければ, 復水器細管全体に対する期待費用 $K(\hat{\infty}(S), b)$ が求まる. 表3, 表4に最適取替基準 $\hat{S}$ における詳細な計算結果を記しておく. また, 図6に取替直後から取替直前までの状態遷移の一例を示した.

図4~5および表3~4からわかるように, 破損点 $b$ の値によって最適取替基準 $\hat{S}$ とそのとき

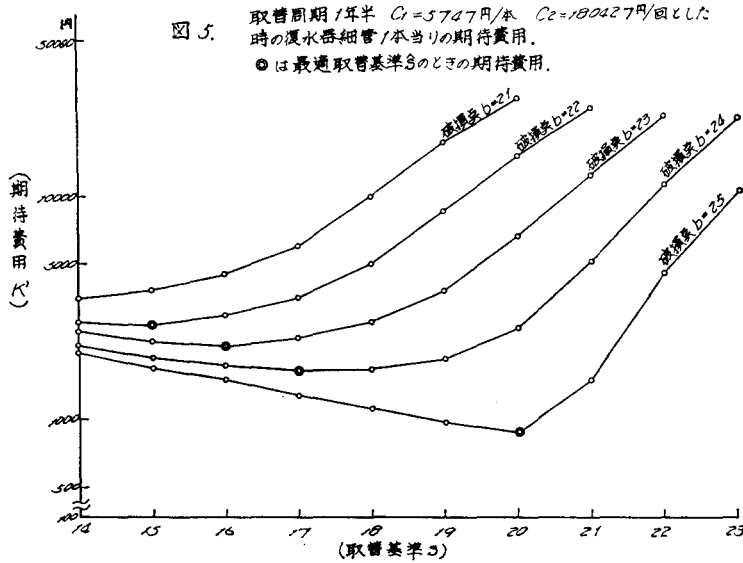


表3. 最適取替基準 $\hat{S}$ における計算結果(I)  
 $C_1=5747$ 円/本  $C_2=95472$ 円/回  $M=10120$ 本

破損点	最適取替基準 $\hat{S}$	期待費用 $K(\hat{\infty})$ (円×M)	取替本数 (本)	取替費用 (千円)	故障本数 (本)	故障損失費 (千円)
21	14	39734	4937	28373	119	11361
22	15	31846	4312	24781	74	7065
23	17	25998	3145	18074	83	7924
24	18	19912	2734	15712	44	4200
25	20	12383	2156	12391	0	0

注: 破損点21の時は最適取替基準 $\hat{S}$ は不明だが計算結果の中は最適なものに記した.

表4. 最適取替基準 $\hat{S}$ における計算結果(II)  
 $C_1=5747$ 円/本  $C_2=180427$ 円/回  $M=10120$ 本

破損点	最適取替基準 $\hat{S}$	期待費用 $K(\hat{\infty})$ (円×M)	取替本数 (本)	取替費用 (千円)	故障本数 (本)	故障損失費 (千円)
21	14	49844	4937	28373	119	21471
22	15	38133	4312	24781	74	13352
23	16	30560	3685	21178	52	9382
24	17	23306	3145	18074	29	5232
25	20	12383	2156	12391	0	0

注: 破損点21の時は最適取替基準 $\hat{S}$ は不明だが計算結果の中は最適なものに記した.

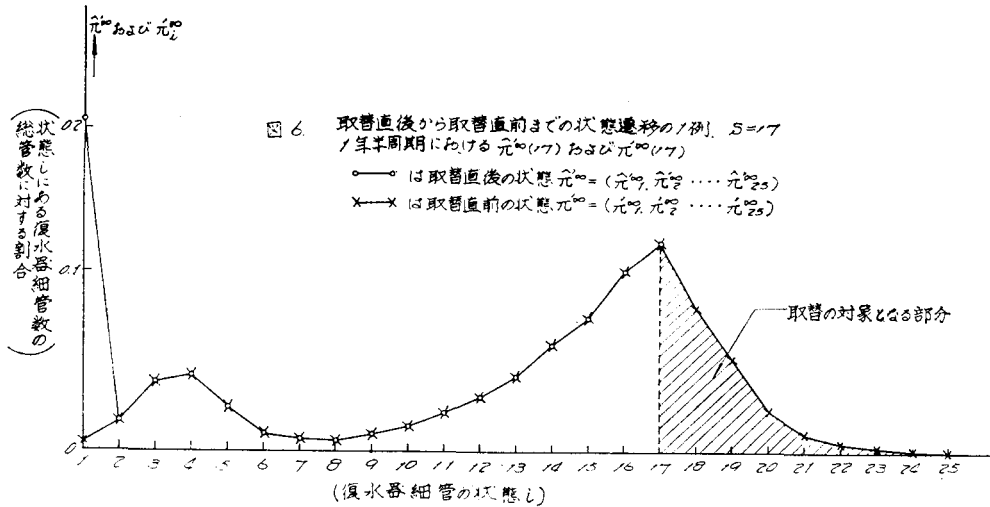


図 6. 取替直後から取替直前までの状態遷移の割合,  $S=17$   
1 年半周期における元<sup>(0)</sup>(17) および元<sup>(0)</sup>(17)

○ は取替直後の状態元<sup>(0)</sup> = (元<sup>0</sup>, 元<sup>1</sup>, …, 元<sup>25</sup>)  
x は取替直前の状態元<sup>(0)</sup> = (元<sup>0</sup>, 元<sup>1</sup>, …, 元<sup>25</sup>)

の期待費用がかなり異なった値を示している。ところで、エディオグラフの振巾がいくらになったらその細管が故障するかを推定することは困難であるので、この計算結果から直ちに実際に用いる最適取替基準を決定することはできない。しかしながら、これらの計算結果と細管の取替実績や故障のデータを比較対照することにより、現在実行している取替基準がどの位置にあるかをかなりの精度で推定することが可能であり、最適取替基準の指針として用いることができる。例えばこの復水器について、過去の取替の実績を調べてみると、昭和37年4月にはエディオグラフの振巾が13mm 以上のものをすべて取替えている。取替基準  $S=13$  に相当する。また、昭和38年4月には14mm 以上のものを、昭和39年12月には16mm 以上のものをすべて取替えている。このことは、最初は細管が故障したことによる損失を小さくするように、つまり安全を見込んで取替基準を小さめにとり、実績をみて次第に取替基準を上げていく傾向を示している。このような過去3回の実績と図4～5を対照すると、最適な取替基準は16mm( $S=16$ )～20mm( $S=20$ )の範囲にあって、しかも最適取替基準は  $S=16\sim 18$  の可能性が大きいと推定される。

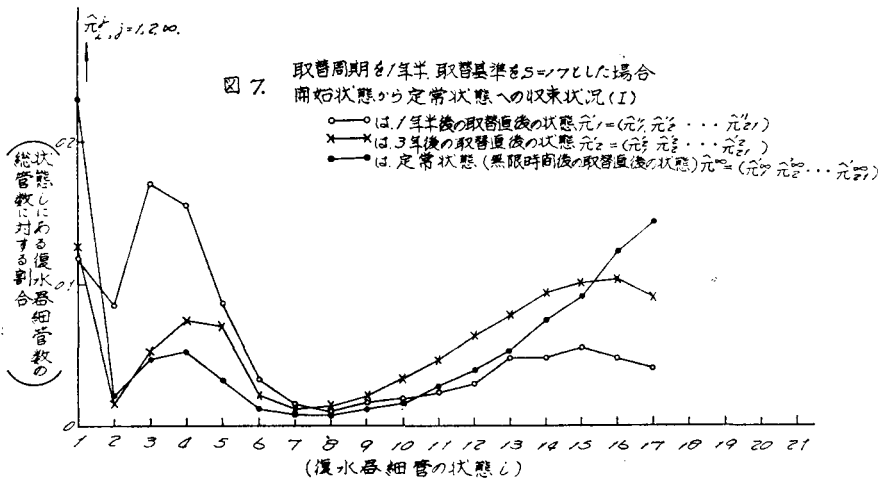
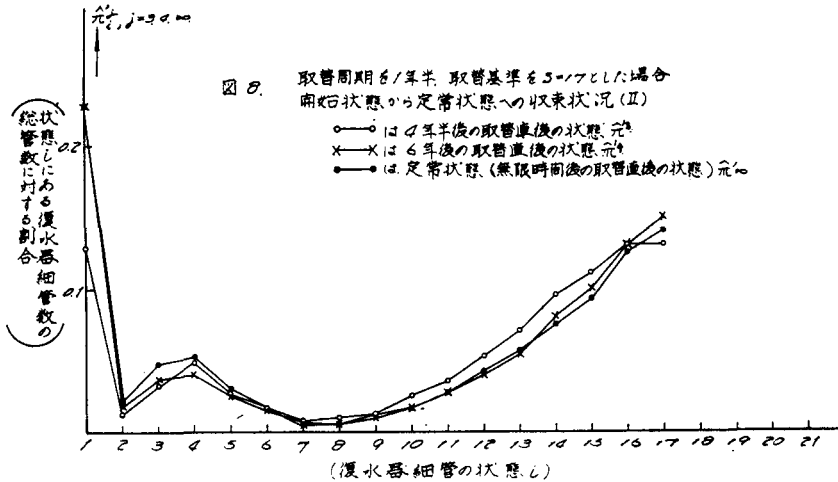


図 7. 取替周期を1 年半、取替基準を  $S=17$  とした場合  
開始状態から定常状態への収束状況(I)

○ は1 年半後の取替直後の状態元<sup>(1)</sup> = (元<sup>0</sup>, 元<sup>1</sup>, …, 元<sup>25</sup>)  
x は3 年後の取替直後の状態元<sup>(2)</sup> = (元<sup>0</sup>, 元<sup>1</sup>, …, 元<sup>25</sup>)  
● は定常状態(無限時間後の取替直後の状態)元<sup>(∞)</sup> = (元<sup>0</sup>, 元<sup>1</sup>, …, 元<sup>25</sup>)



また、この計算では第2節に示した仮定にしたがって、定常状態のみを考慮して最適取替基準を求めた。その妥当性を調べるために  $\hat{n}^0$  (初期状態) から、 $\hat{n}^{\infty}$  (定常状態) への収束状況を図7～8に示した。これらの図から列期状態ですべての復水器細管が新管(状態1)であるとしたとき、4回の取替でほとんど定常状態に収束していることがわかる。実際には、悉くは新管でないので3回の取替で定常状態と見なせる状態に近づいていることになる。したがって定常状態について求めた最適取替基準を実際取替方針として実施しても大きな誤差は生じないことを示している。

遷移確率行列は重要であるので今後、データを積み重ねて行き、より正確な遷移確率行列が求められるよう復水器細管の保守管理を行なう。

5. むすび

以上、復水器細管の取替問題について、第2節の仮定のもとに、この問題に対する解析を示し、最適取替方針を決定する方法を与えた。また、この方法を仙台火力発電所復水器細管の取替問題に適用し、実際の資料による計算結果にもとづいて、この方法の妥当性について考察した。適用例についての考察からもわかるように、ここで用いた仮定は実際とそれほどかけはなれたものではないので多くの場合、本論文は復水器細管の保守ならびに取替方針の決定のための指針として活用できるものと考えられる。ただし、防蝕塗装が行なわれている場合には、遷移確率が塗装の回数によってどのように変わるかを調べる必要があり、問題はかなり複雑なものになると思われる。

最後に本研究は火力発電技術協会東北文部の委託研究として行なわれたものであり、御援助をいただいた当協会並びに有益な御意見、御討論をいただいた研究会の方々に深く感謝します。また、資料の作成および計算結果の検討に御協力をいただいた仙台火力発電所の方々に深く感謝します。

## 参 考 文 献

1. 佐治信男, 白根礼吉, 横井満, 大前義次, オペレーションズリサーチ／理論と実際. 培風館
2. Thomas. Saaty and Joseph Bram., Nonlinear Mathematics, McGraw-Hill, New York 1964.
3. R.A. Howerd., Dynamic Programming and Markov Processes, Technology Press and Wiley 1960.
4. 森口繁一監訳., チャーチマン, アコフ, アーノフオ, ペレーションズ・リサーチ入門, 紀伊国屋