

炉筒煙管ボイラーの信頼性解析と保全方法の検討

Reliability and Rational Maintenance Plan for Fire-Tube Boiler

泉 山 浩 郎
分 部 大 樹¹⁾

要 約

実際の建物の設備管理日報などから、故障データなどを収集し、信頼性工学手法を用いて、炉筒煙管ボイラーの信頼性解析を行った。解析は故障データの比較的多い構成要素について、累積ハザード法で行い、ワイブル分布のパラメータを推定した。推定結果を利用して、予防保全すべき構成要素の候補の選択、合理的保全周期の設定について検討したので報告する。

目 次

- I. はじめに
- II. 本報告の位置付けと予防保全
- III. 対象機器と構成要素への分解
- IV. 故障の発生状況
- V. 信頼性データ解析
- VI. 保全方法の検討
- VII. おわりに

I. はじめに

経済の回復が遅れ、保全費を削減させたいという建物所有者の要望や地球温暖化抑制のために機器・部材を有効利用したいというニーズから、保全に関心が寄せられるようになった。

設備機器には建築部材と異なり、稼働部を持つものが多いため保全は重要な活動である。

現在、設備機器に対して行われている保全は、製造メーカーや関

係団体の指針などに沿って行われている例が多いが、競合する同業他社との関係や製造者責任（PL）問題などから、それら指針に保全内容の設定について明確に説明しているものがほとんどない。

保全は構成要素ごとに行われることが多いため、保全の合理化のための解析も要素ごとに行われる必要があるが、そのような研究はほとんどない^{1), 2), 3)}。

本報告では、実際の設備管理日報から約10年間の故障データなどを収集し、累積ハザード法と呼ばれる信頼性工学の一手法を用いて炉筒煙管ボイラーの構成要素ごとの解析を行った結果と、それに基づいて予防保全すべき構成要素の候補の選択や合理的な保全周期の設定について検討したので報告する。

II. 本報告の位置付けと予防保全

本報告は、Fig.1に示す建築設備のライフサイクルの運用段階で、故障の発生を未然に防止するために行われる予防保全の合理化と、故障発生後にその現象・被害の解消のために行う事後保全の予算計

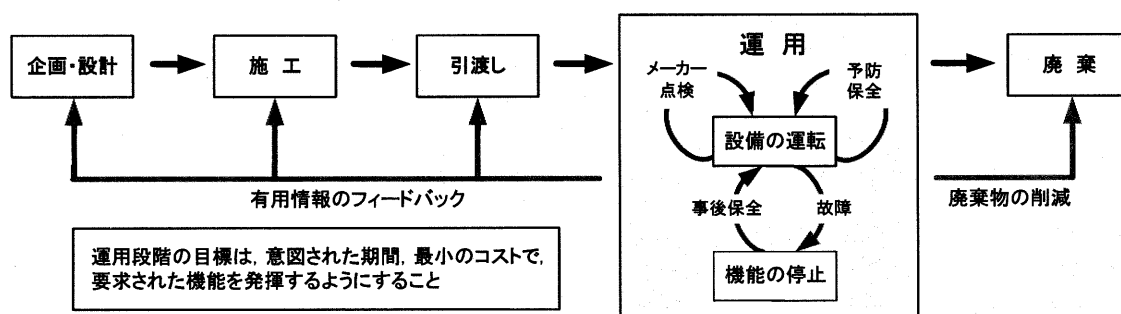


Fig.1 建築設備のライフサイクルにおける保全の位置付け
(Location of Maintenance in Building Equipment Life cycle)

1) 鹿島建物総合管理株式会社

キーワード：炉筒煙管ボイラー，故障，信頼性。
累積ハザード法，ワイブル分布，点検，保全，事後保全，
予防保全

上のために必要な設備機器の定量的な信頼性データに関するものである。予防保全は、故障の発生を未然に防止し、使用可能状態を維持するために計画的に行う保全である。これらの定義などは日本工業規格 JIS Z8115-1981 信頼性用語⁴⁾に書かれている。

定量的な信頼性データを示すことは、運用段階の上流に位置する企画・設計・施工・引渡しのそれぞれの段階へ業務改善のための有用な情報をフィードバックし、品質の高い建物造りに繋がると同時に、合理的保全によって資源の有効利用が図られ、廃棄物が削減され、地球温暖化抑制に貢献する。

なお、本報告では、機器が保全の目標を、①意図された期間、②最小のコストで、③要求された機能を発揮する、運用の合理化と考えている。

建物が生産されるまでの段階で、建物の運用に悪影響を与えるさまざまな原因が取り込まれる点も考慮する必要があるが、それは主に品質マネジメントシステム (ISO9000 s) およびコミショニングで扱うものとし、ここでは議論しない。

Ⅲ. 対象機器と構成要素への分解

対象としたボイラーは、常用出力 5000[kg/hr]、ガス（都市ガス 13A）常用消費量 353[Nm³/hr]の炉筒煙管ボイラー 2 台である。約 10 年前に竣工した東京に立地する延床面積約 14 万 m²の事務所・ホテルなどから構成される複合建屋に設置されている。主に吸収式冷凍機の蒸気供給熱源として使用されており、年 2 回の製造メーカーによる点検と年数回の自主点検が行われている。

保全は部位・部品などの構成要素ごとに行われることが多いため、機器に発生した故障を一括して解析するのではなく、その要素ごとに解析することが重要である。そこで、ボイラー製造メーカーが推奨する保全内容を参考に、機器を Fig. 2 に示すような大・中・小分類の要素に分けた。

大分類は、缶体・燃焼系・全体制御・給水系・排水系である。燃焼系の中分類は制御装置（エアダンパーやバーナーなど）・押込みファン・ガス圧力計・その他、給水系は給水ポンプ・給水系制御・水処理装置・その他という中分類に分けられる。給水系の制御と水処理装置という中分類はさらに、流量計・水面計・フロートスイッチと軟水装置・薬注装置という小分類に、それぞれ細分化される。缶体・全体制御・排水系（自動ブロー装置）は大分類のみである。

Ⅳ. 故障の発生状況

竣工以来、2 台のボイラーに発生した故障を大分類で示したものが Fig. 3 である。故障は 175 件発生している。故障には、ボイラーが停止するような重大なものから運転に支障がない水漏れのような軽故障のようなものまで全てを含んでいるが、パッキンやフィルターなどの消耗品と考えられるものの交換などは含んでいない。給水系・燃焼系・排水系の故障が多く、全体に対する割合はそれぞれ、48%、26%、16%で、これら三つの大分類の故障で全体の約 9 割を占める。残りの大分類である全体制御と缶体の故障は少ない。

Fig. 4 は中・小分類間わず最も小さな分類で描いたパレート図で、排水系の故障が多く 28 件、給水系の水面計・ポンプ・薬注装置の故障も多く、それぞれ 20、16、15 件である。燃焼系のガス圧力計の故

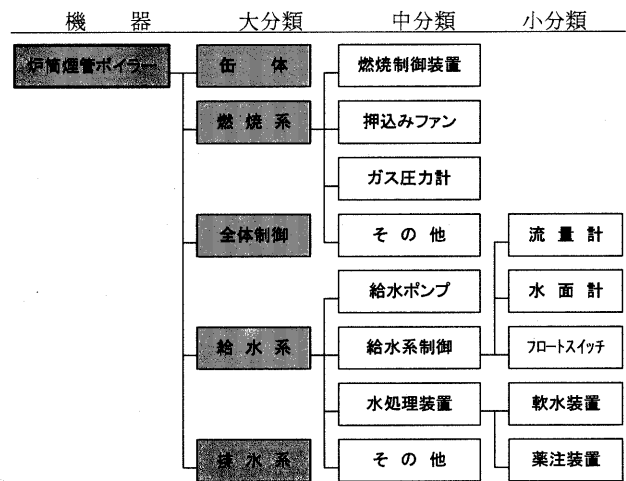


Fig. 2 炉筒煙管ボイラーの構成要素への分割
(Components of Fire-Tube Boiler)

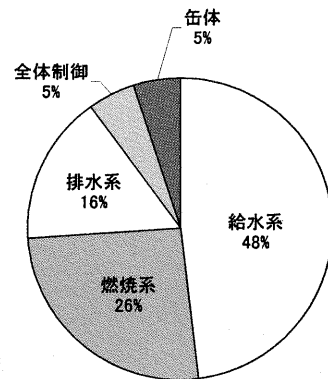


Fig. 3 炉筒煙管ボイラーに発生した故障割合
(Failures on Fire-Tube Boiler)

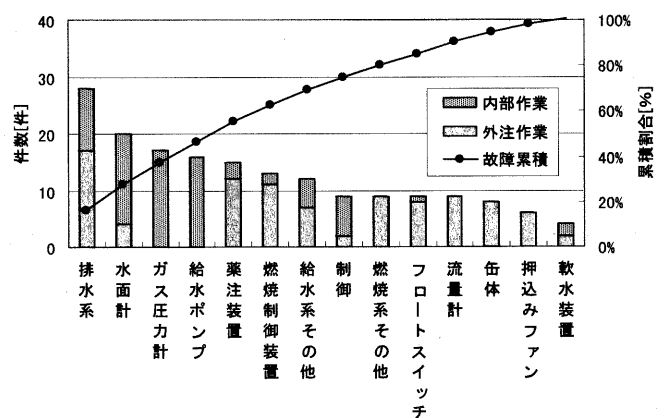


Fig. 4 炉筒煙管ボイラーに発生した故障の詳細
(Failures on Fire-tube boiler on Component Level)

Table 1 ワイブル分布の信頼度・故障率および尺度パラメータの算出
 (Equations for Reliability, Failure Rate of Weibull Distribution)

$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right]$	(1)	ただし, $R(t)$: 信頼度	[-]
$\lambda(t) = \frac{m}{\eta^m} t^{m-1}$	(2)	$\lambda(t)$: 故障率	[1/日]
$\eta = \exp\left[-\left(\frac{b}{m}\right)\right]$	(3)	m : 形状パラメータ (回帰線の傾き)	[-]
		η : 尺度パラメータ	[日]
		b : 回帰線の切片	[-]
		t : 暦日数	[日]

障は 17 件である。これら五分類の故障で全故障の半分以上を占める。燃焼系の押込みファンや給水系の軟水装置の故障は少ない。

V. 信頼性データ解析

1. 累積ハザード法と形状パラメータの意味

累積ハザード法⁵⁾は、故障間隔 t と累積ハザード ΣHz を求め、それらを横軸が $\ln(t)$ で、縦軸が $\ln(\Sigma Hz)$ の両対数グラフにプロットし、一次回帰線を引き、その傾きと切片からワイブル分布の形状・尺度パラメータを推定する手法である。故障間隔データのほかに、点検・予防保全や観測終了時点での打ち切りデータも含んで解析する。

累積ハザード ΣHz は、ハザード Hz を加算したもので、ハザードはデータを小さいものから昇順に並べた時の逆順位の逆数のうち、打ち切りの解析対象の故障数を示し、説明変数の逆の次元をもつ。

Table 1 中の式 (3) は、尺度パラメータ η を求める式である。従来は 10 のべき乗で表現されたが、パーソナルコンピュータと表計算ソフトウェアの普及とともに自然対数表現が用いられることが多いので、自然対数のべき乗で表した。

2. 累積ハザード解析

発生した故障を Fig. 2 に示した最小の分類ごとに、外注業者に修理を依頼する対応 A と建物常駐の設備管理者が修理を行う対応 B に区別して解析した。前者は修繕費などが発生するが、後者の場合はほとんど発生しない。

(1) 燃焼系の解析

累積ハザード法を用いて解析する要素は、制御装置・押込みファンの対応 A とガス圧力計の対応 B である。Fig. 5(a)~(c) にその結果を示す。制御装置の形状パラメータは $m=0.7$ で初期故障モードを、押込みファンの形状パラメータは $m=2.8$ で摩耗故障モードを、ガス圧力計は $m=0.8$ で初期故障モードを示している。

予防保全は $m>1$ の押込みファンだけに有効で、この場合の尺度パラメータ η は、

$$\eta = \exp[-(-19.0/2.76)] \approx 970 \text{ [日]} \cdots (4)$$

と計算される。

燃焼制御装置は、空燃比を調整するために現場で組み立てられ、うまく調整できるまで時間がかかるため、初期故障モードを示すと予想できる。ガス圧力計は、ガス漏れや残針など製品不良が多く、初期故障モードを示すものと考えられる。

(2) 給水系の解析

流量計・フロートスイッチ・薬注装置の対応 A、水面計の対応 B

が解析の対象である。Fig. 5(d)~(g) に結果を示す。 m の値は、流量計・フロートスイッチ・水面計がそれぞれ、1.3, 1.2, 1.1 で摩耗故障モードを示している。

薬注装置については 0.8 で初期故障モードを示している。薬注装置はホースの耐久性が低いようでよく交換されており、材質などを再検討する余地がある。

(3) 排水系の解析

対応 A・B を分けて解析した。結果を Fig. 5(h)~(i) に示す。 m はともに 1.0 で偶発故障モードである。予防保全は意味がない。

(4) まとめ

累積ハザード解析の結果を Table 2 に示す。尺度パラメータは、290~1140[日]まで変化している。給水ポンプの故障率が高いのは、パッキン・ベアリング交換やエア噛み対応が多いためである。

VI. 保全方法の検討

累積ハザード解析の一次回帰線の傾き、形状パラメータ m は、その要素を予防保全すべきか否かの判断に利用できる。Fig. 6 に示すように m によって故障モードが特定できるためである。 $m<1$ の場合は、経年とともに故障率が低下する初期故障モードで製造段階、つまり設計・施工での“まずさ”が故障の原因であることを表す。 $m \approx 1$ の場合は、突発的な防ぎようのない原因によって故障が発生する偶発故障モードを示し、過去の使用時間や故障履歴に関わらず故障率が一定になる。 $m>1$ の場合は、経年とともに故障率が増加する劣化による摩耗故障モードを示す。Table 2 に示す構成要素の累積ハザード解析の結果を用いて、信頼度と故障率を計算したが、それらを Fig. 7 に示す。信頼度が折線グラフで、故障率が棒グラフで示されている。なお、故障率は横軸に合わせ年単位に換算している。

Table 2 と Fig. 7 から、形状パラメータ m と故障率の変化が、実際、上で述べたようになっていることがわかる。

予防保全を行うべきである要素は $m>1$ のものだけである。 $m=1$ の場合は故障率が変化しないため、予防保全は費用の無駄で $m<1$ の場合は時間経過と共に故障率が低下していくため、予防保全によって反って故障率が増加してしまうためである。予防保全が有効と考えられる構成要素は、 $m>1$ の故障率が経年とともに増加する摩耗故障モードのもので、押込みファン・流量計・水面計・フロートスイッチである。

使用開始から 1 年後の信頼度が 0.5 以下の要素は、ガス圧力計(対応 B)・水面計(対応 B)・排水系(対応 A)である。ガス圧力計は

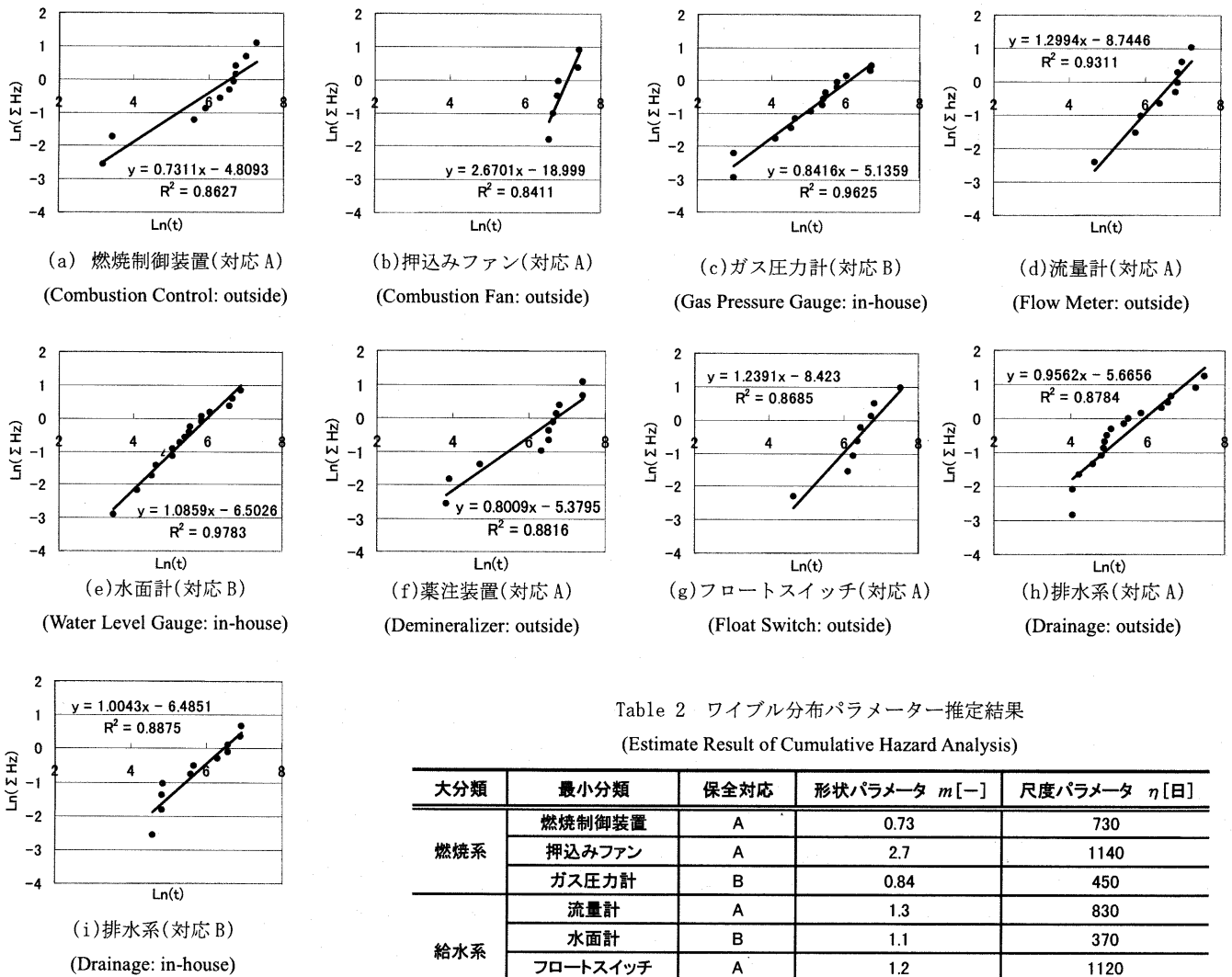


Fig. 5 構成要素の累積ハザード解析
(Results of Cumulative Hazard Analysis)

Table 2 ワイブル分布パラメータ推定結果
(Estimate Result of Cumulative Hazard Analysis)

大分類	最小分類	保全対応	形状パラメータ m [-]	尺度パラメータ η [日]
燃焼系	燃烧制御装置	A	0.73	730
	押込みファン	A	2.7	1140
	ガス圧力計	B	0.84	450
給水系	流量計	A	1.3	830
	水面計	B	1.1	370
	フロートスイッチ	A	1.2	1120
	薬注装置	A	0.80	830
排水系	-	A	1.0	290
		B	1.0	660

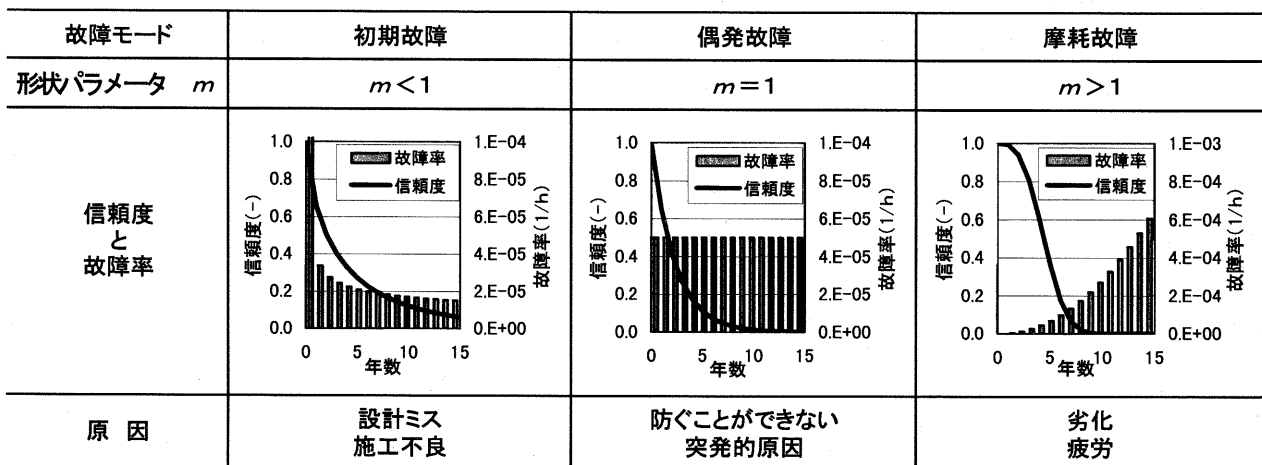


Fig. 6 ワイブル分布形状パラメータと故障モードとの関係
(Relation between Weibull Shape Parameter and Failure Mode)

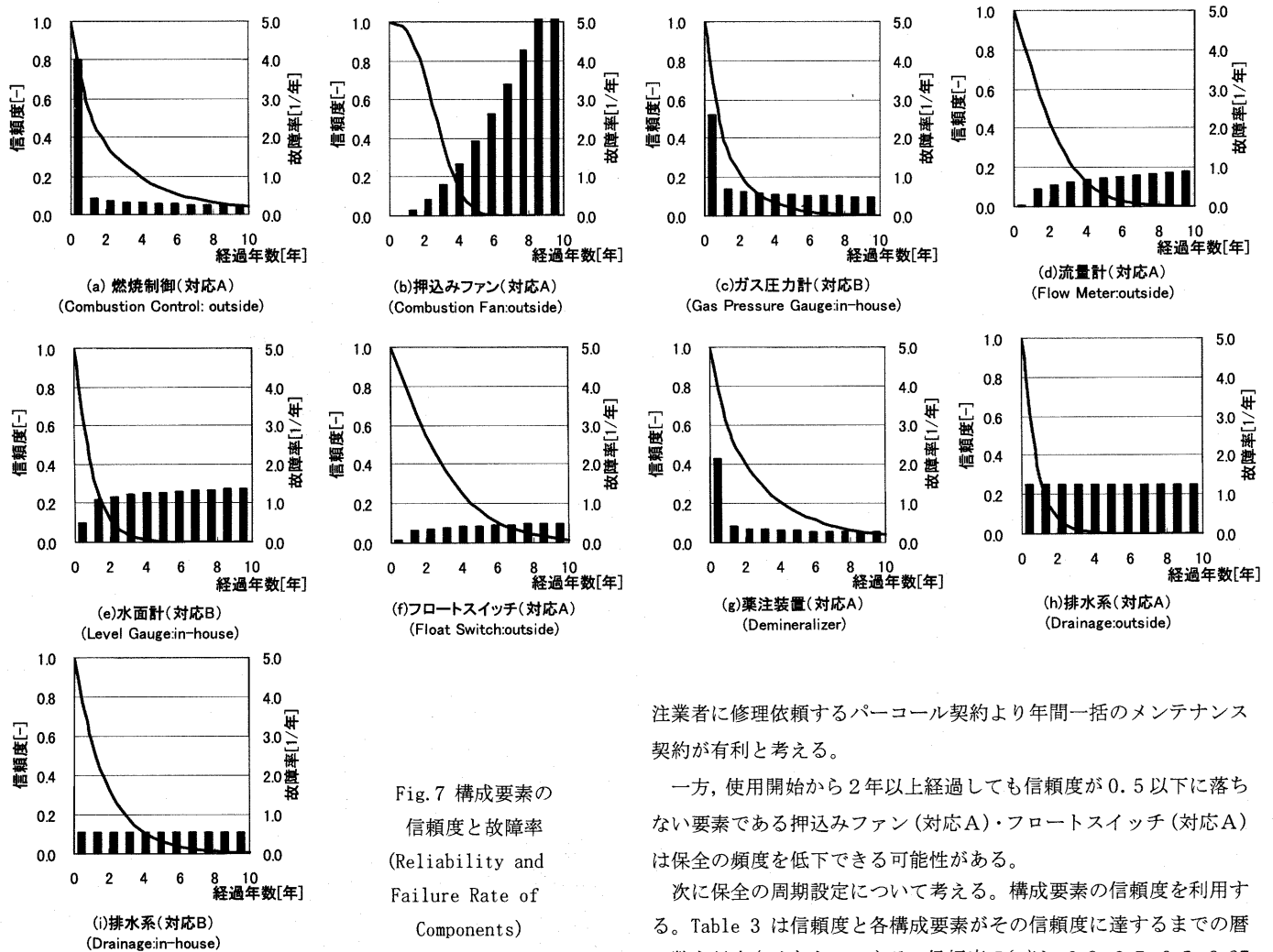


Fig. 7 構成要素の信頼度と故障率
(Reliability and Failure Rate of Components)

Table 3 炉筒煙管ボイラー構成要素の点検・保全周期設定
(Maintenance Interval for the components of Fire-Tube Boiler)

大分類	構成要素 (最小分類)	保全 対応	設定信頼度に対応した暦日数[日]			
			0.9	0.7	0.5	0.37
燃焼系	燃焼制御装置	A	30	180	440	720
	押込みファン	A	500	780	1000	1140
	ガス圧力計	B	30	130	290	440
給水系	流量計	A	150	370	620	820
	水面計	B	50	140	265	370
	フロートスイッチ	A	170	470	830	1120
	薬注装置	A	50	230	530	820
排水系	-	A	30	100	200	290
		B	70	240	460	650

ガス漏れなどによる交換が多く、取付け部の工夫や圧力計メーカーの変更を試みる必要がある。水面計は蒸気漏れやガラス交換が多く、ガス圧力計同様、取付け部の工夫や水面計ガラスの仕様変更を行う。排水系は自動ブロー装置に関わるトラブルであり、特性寿命ともいわれる尺度パラメーターが小さいことから、故障の発生の都度、外

注業者に修理依頼するパーコール契約より年間一括のメンテナンス契約が有利と考える。

一方、使用開始から2年以上経過しても信頼度が0.5以下に落ちない要素である押込みファン(対応A)・フロートスイッチ(対応A)は保全の頻度を低下できる可能性がある。

次に保全の周期設定について考える。構成要素の信頼度を利用する。Table 3は信頼度と各構成要素がその信頼度に達するまでの暦日数を対応させたものである。信頼度 $R(t)$ は、0.9、0.7、0.5、0.37の4レベルを想定した。複数レベル想定した理由は、

- ①設置用途の重要性
- ②修理の容易性
- ③設置台数などの冗長性

など、設備機器ごとのさまざまな状況を考慮する必要があるためである。なお0.9は従来から機械系部品に用いられているレベルを0.5は故障と非故障の割合が同数のレベルを、0.37は指数分布の特定数の時間の信頼度を、0.7は0.9と0.5の中間のレベルを想定している。

例えば $R(t)=0.7$ に設定すると、流量計(対応A)は370日、押込みファン(対応A)は780日ごとの保全が必要であることを示している。ほかの要素についても、原則的に同様に保全周期を求めて対応する。

予防保全の候補の要素に対して、別々に保全することはコストアップに繋がる場合があるので、要素をまとめてそれらの最短周期で保全するなど工夫する。それ以外の要素に対しては、迅速な事後保全ができるように体制作りを行うとともに、メーカー依頼の外注作業の場合はその予算計上を怠らない。

点検は、医療行為の定期検査に類似している。正常・異常に関わらず一定の周期で行われることが多い。あまり問題視されてこなかったのは、信頼性の観点から考えると、機器保証という観点から製

造メーカーの指示に従わざるを得なかったこと、未然に故障や被害の発生を防いだ事例があったためと思われる。しかし、それに投じられる費用は年間に実施される回数も多いことから少なくなく、また点検報告書の内容が正常状態であることを示すことが多いため、点検周期の妥当性について検討する必要がある。

点検は保全と異なり故障発生の原因の発見を目的としていると考え、保全の設定信頼度を上回る信頼度を設定する。保全が $R(t)=0.7$ の信頼度を設定した場合には、例えば $R(t)=0.9$ を点検の設定信頼度と設定する。具体的に燃焼系の押込みファンの場合を考えると、500 日ごとに点検を、780 日ごとに予防保全を行うことになるが、実用上複雑さが増すので、点検は 400 日ごと、予防保全は 800 日ごとと設定しても良いと考える。

さらに、点検の検出力に配慮する。検出力というのは、異常あるいはその兆候を発見する能力と考え、例えば 2 台設置されている場合、押込みファンの点検の信頼度設定 $R(t)=0.9$ では検出力は最大でも 0.2 であり、10 回点検して異常が 2 件とわかることになる。このように点検を故障発生原因の発見を行うものとするれば、効率的に実施するには、信頼度設定とともに設置台数なども考慮する必要がある。

Ⅶ. おわりに

累積ハザード法を用いて、炉筒煙管ボイラーの構成要素の信頼性解析を行った。さらに、解析結果を利用して、予防保全の是非を検討した。予防保全すべき要素は、押込みファン・流量計・水面計・フロートスイッチの 4 要素である。そのほかの要素については、事

後保全を速やかに行えるように体制を作り・予算計上行うことが重要である。

さらに、点検も含め保全周期の設定方法を検討した。保全周期の設定は、用途の重要性、修理の容易性、設置台数などの冗長性を考慮した信頼度に基づいて行うものとし、点検周期の設定は保全周期設定用信頼度より大きな信頼度で行うことを検討した。

このような解析は、実際の故障データなどが豊富に集まれば、精度向上と共に類似したさまざまな条件のボイラーについても検討できる。故障データなどが容易に入力・蓄積可能な CAFM（コンピュータ支援施設管理システム）の普及が望まれる。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、鹿島建物総合管理（株）関係者の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高草木明；空調機器の信頼度・保全度調査研究，日本建築学会計画系論文報告集，第 436 号，(1992. 6)，pp. 1-9.
- 2) 田中毅弘，後藤滋，倉持一雄；病院設備の信頼性解析（医科大学を例として），第 3 報 信頼性・保全性の詳細検討，空気調和・衛生工学会論文集，No. 49，(1992. 6)，pp. 47-53.
- 3) 泉山浩郎；雑排水ポンプシステムの累積ハザード法による信頼性解析と保全方法の評価，空気調和・衛生工学会論文報告集，No. 85，(2002)，pp. 69-76.
- 4) 日本規格協会；信頼性用語，JIS Z8115-1981.
- 5) 日本信頼性学会編；信頼性ハンドブック，1997. 4，pp. 138-143.