

# 原子力発電所の保全活動における経済性および安全性の 定量的評価手法の構築

Development of quantitative evaluation method for the cost and safety  
in maintenance plan of Nuclear Power Plant

東北大学大学院工学研究科  
東北大学大学院工学研究科  
東北大学大学院工学研究科  
東北大学大学院工学研究科

白石 夏樹  
橋爪 秀利  
結城 和久  
高橋 信

Natsuki SHIRAISHI  
Hidetoshi HASHIZUME Member  
Kazuhisa YUKI  
Makoto TAKAHASHI Member

**Abstract** The purpose of this study is to develop a method for quantitative evaluation of the running cost and safety in a Nuclear Power Plant (NPP). A new model for numerical evaluation is proposed based on the concept where the four issues such as Cost of Electricity (COE), maintenance cost, loss by the failures, and several risks are evaluated statistically by using the Monte Carlo simulation. The results show different dependence on the parameters used in the model. These results would be useful to discuss and determine the suitable maintenance plan in the NPP.

**Keywords** Nuclear Power Plant, Maintenance, Risk Assessment, Cost of Electricity, Cost Assessment

**Contact** 白石夏樹 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 01 量子エネルギー工学科  
e-mail : nshira@karma.qse.tohoku.ac.jp

## 1. 緒論

我が国の原子力発電は、世界的に見て信頼性の高い運転実績を誇るが、その主な要因の一つとして考えられるのが保全活動である。特に我が国では、電気事業法に基づき実施される定期検査、またそれと同時に多数の機器に対して分解点検を実施するなど、安全性の維持および向上に努めている。

一方、電気事業法の改正による「電力の自由化」を受けて、他産業に対する価格競争力の維持および向上のために、経済性の向上を考慮していく必要があると考えられる。このような状況の中、現在の手厚い保全活動は高い信頼性を実現する一方で、経済的な側面から見ると必ずしも最適とは言えない。したがって今後、高い安全性の維持と経済性の向上を両立させるために、保全活動の適正化に着手する必要があると考えられる。

しかしながら、現在利用されている経済性および安全性の評価手法では、各々の評価は独立に行われ、経済性および安全性の相互関係を調べることは困難である。また保全活動の変更が経済性および安全性に及ぼす影響を定量的に評価することも困難であると考えら

れる。

以上の背景のもと、本研究では経済性の向上および安全性の維持を両立可能とするような、保全活動の最適条件を定量的に導出可能な評価手法を構築することを目的とする。

## 2. 計算モデル

### 2-1. プラントのモデル化における仮定

本研究において評価の対象となる機器は、確率論的安全評価(PSA)で使用され、かつ国内49プラントの過去の運転実績から、時間故障率 $\lambda[1/h]$ が算出されている53機種[1]とする。ここで時間故障率とは単位時間あたりの故障発生期待値のことを示し、以降故障率と呼ぶことにする。

原子力発電所のシステムは非常に多くの機器により複雑に構成されており、その構造を計算モデルとして表現することは非常に困難である。本研究では以下の仮定をすることにより、計算モデルの単純化を行っている。

#### (1) 各機種の性能は、動作環境に依存しない

プラントを構成する様々な系統に存在する機種(ポンプや配管など)は、使用環境により故障率や動作性能が異なると考えられるが、本

研究では、使用環境による性能の差は考慮せず、全て同一であるとする。

### (2) システムの冗長性を考慮しない

安全弁やポンプなど、プラントの安全系を構成する機器は並列接続などの冗長性を持たせることで安全性を向上させているが、本研究ではシステムの冗長性は考慮しない。

### (3) 機器のいずれか 1 つでも停止するとプラントの運転は停止する

本研究で対象とする全ての機種は、プラントの運転において重要な役割を担い、保全活動または故障により停止した場合、プラントの運転も停止すると仮定する。この仮定は、プラント内に物理的に点在している各機器の間に、直列的な関係性があることを意味する。

### (4) 機器の故障率は一定とする

典型的な機器の故障率は、Fig1[2]に示すように初期故障期間、偶発故障期間、摩耗故障期間の 3 つの期間を経る、バスタブ型の分布をとる。ここで、原子力プラントで使用される機器はデバッグなどが実施されるため、初期故障は考慮しないとする。また、30 年を超えて運転をするプラントに対しては、経年変化事象を考慮する必要があるが、本研究における計算対象期間  $T_{life}$ [year]は 30 年とし、各機器は有効寿命の期間、つまり偶発故障期間中でのみ使用するものとする。したがって摩耗故障は考慮せず、偶発故障期間のみを扱う。

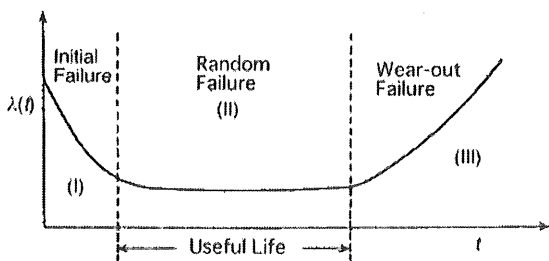


Fig1. bath-tub curve

## 2-2. 自主点検および定期検査の実施方法

ある時間  $t$ [h]において、機器が故障しない確率を信頼度というが、機器の故障率 $\lambda$ [1/h]が時間の経過によらず一定である場合、機器の信頼度  $R(t)$ は式(1)のように指数関数で表される。

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad (1)$$

ここで、機器が正常な動作を保証するのに最低限必要な信頼度を必要信頼度  $R_{required}$  と定義すると、ある機器の正常動作が保証される期間 $\tau$ [h]は(2)式で与えられる。本研究において、 $\tau$ を動作保証期間とよぶことにする。

$$\tau = -\frac{\log R_{required}}{\lambda} \quad (2)$$

機器に対して定期検査時以外に実施する日常的な点検を自主点検と定義する。本研究では自主点検は Fig2 [3]に示される時間基準保全(以降 TBM)の考えに基づいて実施する。したがって自主点検は、機器の動作時間が動作保証期間に達する前に実施されることになる。動作保証期間と自主点検の実施周期  $T_{mc}$ [h]の関係を Table1 に示す。また、故障率の大きさにより決定される自主点検時間  $T_{in\_min}$ [h]を Table2 に示す。なお自主点検周期の長さは、BWR における定期作動試験の頻度[4]を元に設定した。

定期検査は電気事業法に基づき、周期  $T_{Rl}$ [h]を超えない周期で実施されるものとする。本研究では定期検査実施周期  $T_{Rl}$ [h]を 8760[h](=1 年)とし、その実施期間を 45 日とする。

Table1. Voluntary maintenance cycle

Available time $\tau$ [h]	Voluntary maintenance cycle $T_{mc}$ [h]
$\tau < 2160$ (3months)	720 (1month)
$\tau < 4380$ (6months)	2160 (3months)
$\tau < 6480$ (9months)	4380 (6months)
$\tau < 8760$ (1year)	6480 (9months)
$\tau \geq 8760$	Maintenance is implemented in R.I.

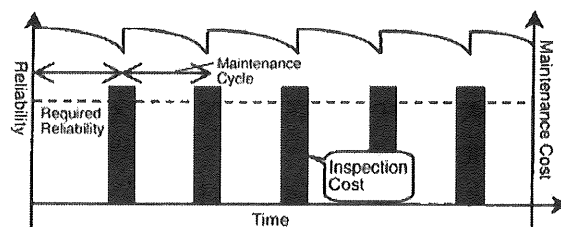


Fig2. Concept of Time-Based Maintenance

## 2-3. 故障と点検の概念

機器の故障率 $\lambda$ [1/h]は時間の経過とともに累積していき、その累積値は時間  $t$ [h]における故障発生期待値となる。本研究では偶発故障のみを取り扱うため、偶発性をモンテカルロ

法により模擬する。ただし本研究では一様乱数を用い、単位時間ステップ  $dt[h]$ (本研究では 24 時間)ごとにその乱数と故障率の累積値を比較し、その大小で故障発生の有無を判断する。また故障発生時には故障の重度を乱数により判断する。ここで規模の大きい故障を重故障、微小な故障を軽故障と定義する。2-1(3)で述べたように、機器が故障するとプラントは停止するが、故障による停止時間を故障時間と定義し、重故障による故障時間を  $T_{maj}[h]$ 、軽故障による故障時間を  $T_{min}[h]$ とする。故障時間は機器の故障率の大きさにより決定する。Table2 に故障率と故障時間の関係を示す。

ある機器の経過時間が  $T_{mc}[h]$ に達した場合、その機器に対して自主点検を行う。その際には故障率の累積値が点検前の累積値の 1/100 に削減されるものとする。Fig3[5]に概念図を示す。また機器に対して一定回数(本研究では 10 回)自主点検を行うごとに、機器に対して分解点検を行う。分解点検時間  $T_{in\_maj}[h]$ の長さを Table2 に示す。分解点検の実施により、故障率の累積値はゼロにリセットされ、新品同様の性能に回復するものとする。

なお点検の際には、プラントの停止に 8[h]、再起動に 48[h]を要するものとする。また故障時には再起動に 48[h]を要するものとし、稼働率の評価の際には点検時間および故障時間にこれらの時間を加算している。

#### 2-4. 時間経過の取り扱い方

プラント内での経過時間  $T[h]$ は、各機器について単位時間ステップごとに故障の有無を判断し、故障が無ければ単位時間ステップだけ時間が経過するものとして扱う。もし故障が複数の機器で発生した場合には、各機器のもつ故障時間の中で最も長い故障時間をプラ

ントでの経過時間とする。また複数の機器で自主点検が実施される場合も、最長の実施時間をプラントでの経過時間とする。Fig4 に時間経過の概念を示す。以上の方法を、プラント内での経過時間が計算対象期間  $T_{life}[year]$ に達するまで反復計算することで、プラントの運転内容を評価する。

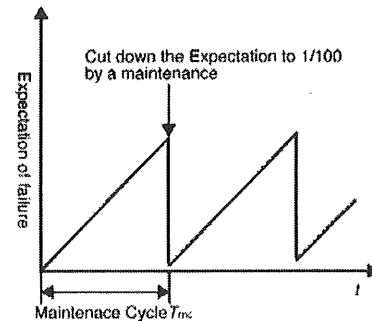


Fig3. Concept of voluntary inspection

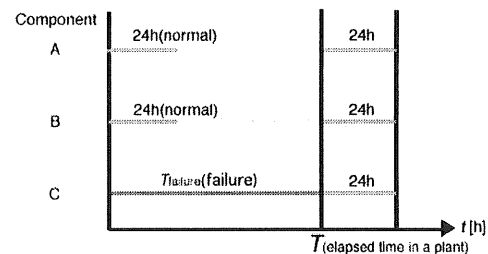


Fig4. Concept of the passage of time in a plant

### 3. 経済性と安全性の評価手法

本研究では、計算モデルについて 10,000 回の反復計算を行い、それらの平均をとることで統計的に評価している。

#### 3-1. 経済性評価

##### (1) 発電コスト

原子力発電所における発電コスト  $I$ [円/kWh] は(3)式[6]で表される。

$$I = \frac{C\gamma}{8760L} + \frac{0.86f}{\alpha\eta} \quad (3)$$

Table2. Inspection time and Failure time

Failure rate $\lambda[1/h]$	Major inspection	Minor inspection	Major failure $T_{maj}[h]$	Minor failure $T_{min}[h]$
	$T_{in\_maj}[h]$	$T_{in\_min}[h]$		
$\lambda < 1.0E-10$	48	24	2160 (3months)	216
$\lambda < 1.0E-09$	36	18	1440 (2months)	144
$\lambda < 1.0E-08$	24	12	720 (1month)	72
$\lambda \geq 1.0E-08$	12	6	360 (15days)	36

各係数は以下の通りである。

$C$ : 建設単価[円/kW],  $f$ : 燃料単価[円/Mcal],

$\alpha$ : 熱効率低減係数,  $\eta$ : 設計熱効率,

$\gamma$ : 年経費率,  $L$ : 設備利用率

式(3)において右辺第 1 項は資本費と設備維持費の和を表し、右辺第 2 項は燃料費を表す。

ここで、燃料単価の変動は少なく一定であると仮定すると、過去の報告[7]より設備利用率 70% の場合の燃料費は、発電コストの約 28% を占める。したがって(3)式から(4)式を得る。

$$I = \frac{C\gamma}{8760L} + 0.28I \Rightarrow I = \frac{C\gamma}{0.72 \times 8760L} \quad (4)$$

ここで建設単価  $C$  は約 31 万[円/kW] [8]、設備利用率 70% の場合の発電コスト  $I$  が 5.9[円/kWh] となること[7]から、(4)式より年経費率  $\gamma$  は(5)式のように与えられる。

$$\gamma = \frac{5.9 \times 0.72 \times 8760 \times 0.70}{310000} \approx 0.084 \quad (5)$$

ここで、プラントの運転時間に対する稼働時間の比である時間稼働率 *availability* と、設備利用率  $L$  がほぼ等しいと仮定すると、発電コスト  $I$  は(6)式により与えられる。

$$I = \frac{310000 \times 0.084}{0.72 \times 8760 \times \text{availability}} \approx \frac{4.13}{\text{availability}} \quad (6)$$

## (2) 保全コストおよび故障による損失

保全コストとは点検などの保全活動にかかったコストのことである。本研究では、保全コストの評価に必要な、各機器に対する点検 1 回あたりのコストのデータがないため、コストを評価するためのポイントを独自に定義し、点検回数と点検時間から導出されたポイントにより評価する。このポイントを保全コストポイント  $C_{mt}$  と定義する。保全コストポイントは(7)式から導出される。ここで  $C_{in\_maj}$  および  $C_{in\_min}$  は機器に対する分解点検および自主点検 1 回あたりのポイントであり、各機器に対する点検時間によって決定される。また  $N_{in\_maj}$  および  $N_{in\_min}$  は各機器に対する分解点検および自主点検の実施回数である。Table3 に点検時間に対する保全コストポイントを示す。

$$C_{mt} = \sum_{i=1}^{53} \left\{ (C_{in\_maj})_i (N_{in\_maj})_i + (C_{in\_min})_i (N_{in\_min})_i \right\} \quad (7)$$

Table3.The value of Maintenance cost points

$T_{in\_maj}$ [h]	$C_{in\_maj}$	$T_{in\_min}$ [h]	$C_{in\_min}$
48	8.0	24	1.6
36	6.0	18	1.4
24	4.0	12	1.2
12	2.0	6	1.0

機器の故障による損失も保全コスト同様、故障時間と故障回数からポイントを導出する。このポイントを損失ポイント *Loss* と定義する。損失ポイントは(8)式から導出される。

$$Loss = \sum_{i=1}^{53} \left[ \left\{ \frac{(T_{maj})_i}{T_L} (N_{maj})_i + \frac{(T_{min})_i}{T_L} (N_{min})_i \right\} C_L \right] \quad (8)$$

ここで  $T_L$ [h] は基準故障時間と定義し、 $T_L$ [h] あたりに発生する損失を  $C_L$  と定義する。また  $N_{maj}$  および  $N_{min}$  は重故障および軽故障の発生回数である。本研究では  $T_L$  を 180[h],  $C_L$  を 100 ポイントとした。

なお、保全コストおよび損失は、それぞれ独立した基準により評価されており、保全コストと損失のポイント同士を絶対評価により比較することはできない。そこで本研究では、基準となる計算モデル(以降基準モデル)から得られたデータを用いて、パラメータを変化させた計算モデル(以降変更モデル)から得られたデータを規格化し、保全コストおよび損失を相対的に評価する。

## 3-2. 安全性の評価

本研究ではリスクの概念を用いて安全性の評価を行う。なお、各リスクは保全コストや損失同様、ポイントの概念を用いる。このポイントをリスクポイントと定義する。また各リスクは異なる基準で評価されるため、各リスクポイント同士を絶対評価することはできない。各リスクの評価は、基準モデルでの計算結果で変更モデルでの計算結果を規格化し、相対的に評価する。プラント全体のリスクは、各リスクの規格化された値を積算することで評価する。

### (1) 自主点検周期の設定時に予測されるリスク

自主点検の実施周期  $T_{mc}[h]$  は、各機器の動作保証期間  $\tau[h]$  に対して TBM の考え方にもとづいて決定されるが、動作保証期間に対して自主点検周期が短いほど、機器の故障のリスクは低減すると考えられる。本研究では点検周期決定時のリスクポイント  $Risk_{mc}$  の評価式を(9)式で定義する。

$$Risk_{mc} = \sum_{i=1}^{53} \left[ Const. + \log \left\{ \frac{(T_{mc})_i}{\tau_i} \right\} \right] \quad (9)$$

ここで  $Const.$  は  $Risk_{mc}$  が負の値を取らないように付す定数であり、その値は任意である。本研究では  $Const.=10$  としている。

### (2) 点検によって生じるリスク

機器に対して点検を実施する場合、作業員の作業ミスや見落としによってリスクが生じる可能性が考えられる。このリスクは点検回数が多いほど、またプラント内での機器の重要度が高い場合ほど大きくなると考えられる。また分解点検のように、作業内容が複雑な場合ほどミスが発生しやすい。したがって本研究では、点検回数、機器の重要度、および作業内容によってリスクを評価する。(10)式に点検によるリスクポイント  $Risk_{in}$  の評価式を示す。

$$Risk_{in} = \sum_{i=1}^{53} \left\{ \frac{(N_{in\_maj})_i}{N_{in\_maj\_std}} + \frac{(N_{in\_min})_i}{N_{in\_min\_std}} \right\} (c_{imp})_i \quad (10)$$

ここで  $N_{in\_maj\_std}$  および  $N_{in\_min\_std}$  はリスク発生の可能性がある点検回数の基準値であり、本研究では  $N_{in\_maj\_std}$  を 4 回、 $N_{in\_min\_std}$  を 20 回としている。また  $c_{imp}$  はプラントにおける機器の重要度であり、重要度が高い場合は 2 ポイント、低い場合は 1 ポイントとする。

### (3) 故障により発生するリスク

機器の故障から事故が誘発されるというリスクが考えられるが、これは機器の故障の重度とプラント内における重要度により決定される。本研究では、故障発生によるリスクポイント  $Risk_{fail}$  は(11)式により定義される。ここで  $c_{maj}$ 、 $c_{min}$  はそれぞれ重故障、軽故障 1 回あたりのポイントである。Table4 に機器の重要度

と  $c_{maj}$ 、 $c_{min}$  の関係を示す。

$$Risk_{fail} = \sum_{i=1}^{53} \left\{ (N_{maj})_i (c_{maj})_i + (N_{min})_i (c_{min})_i \right\} \quad (11)$$

Table4. Failure points

Importance	$c_{maj}$	$c_{min}$
High	5.0	3.0
Low	1.0	0.0

## 4. 計算結果と考察

### 4-1. 点検の方法を変更した場合

基準モデルで設定した点検方法に対し、以下の変更を施す。

#### (1) 定期検査中の機器の点検を簡略化する

基準モデルでは定期検査の実施時に、全ての機器に対して分解点検を実施しているが、変更後は分解点検を実施する必要がある機器に対してのみ行い、残りの機器には簡単な点検のみで済ませるものとする。

#### (2) 自主点検実施の際、他に点検時期が近い機器があればタイミングを早めて点検する

基準モデルでは各機器の動作時間が自主点検周期を超えない限り、点検を実施しなかったが、変更後は点検の実施時期が近い機器が他にあれば、その機器も点検のタイミングを早めて、同時に点検する。これにより点検のためのプラント停止頻度が低減可能になると予測される。

以上の変更の結果、発電コストは基準モデルに比べて約 0.05[円/kWh]増加したが、保全コストで約 27%、損失で約 11%の削減が見られた。またリスクは約 65%低減した。これは(1)の変更により、定期検査中の分解点検の過剰な実施が減少し、保全コストとヒューマンエラーの発生頻度が低減したためと考えられる。また、発電コストの増加は、(2)によって点検頻度が結果的に増加してしまったために、稼働率が低下したことによるものである。しかしながら点検の頻度の増加により、故障による損失、故障によるリスクは低減された。

#### 4-2. 定期検査の実施周期を変化させた場合

定期検査の実施周期を1年から半年ごとに3年までの5通りについて評価を行った。Fig5に基準モデルならびに4-1の変更モデルについて、定検周期を変化させた場合の発電コストとプラントの稼働率、Fig6に保全コストと損失、Fig7にリスクの分布を示す。なおFig6およびFig7については4-1のモデルで得られたデータを相対評価の基準とし、この変更モデルの定検周期を変化させて得られたデータについて評価している。

発電コストに関しては、基準モデル、変更モデル共に定検周期が2年の場合に最適値を持つ分布が得られた。これは定検周期が2年を超えると、自主点検のためのプラントの停止回数が増加するためである。保全コストは定検周期が長くなるほど低減するが、これは定検回数が減少するために、分解点検の実施回数が減少するためである。また、定検周期の延長による損失の増加は見られなかった。プラント内のリスクは、定検周期の延長に関わらずほぼ一定になった。これは分解点検の実施頻度が減ることによるリスクの減少と、故障発生頻度の増加によるリスクの増加がバランスし、全体としてリスクはほぼ一定になるためと考えられる。

#### 5. 結言

本研究で提案する手法により、保全活動プランの変更に対する、経済性および安全性の定量評価が可能になると考えられ、今後の保全活動プランの作成および改善に対して有用である可能性がある。したがって、今後保全コストの絶対評価や、THERP (Technique for Human Error Rate Prediction)によるリスク評価[9]など、評価手法の向上を図る必要がある。また、システムの冗長性や機器レベルから系統レベルへの計算モデルの考慮、さらに状態監視保全の考え方に基づいた定期検査を評価するモデルの構築など、モデルの改良および拡張を行う必要があると考えられる。

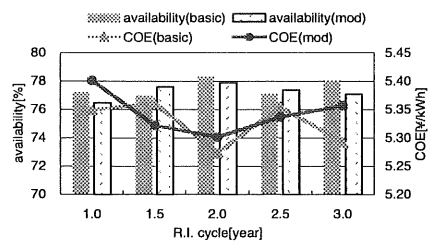


Fig5. COE and availability

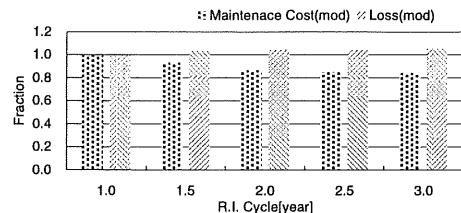


Fig6. Maintenance Cost and Loss

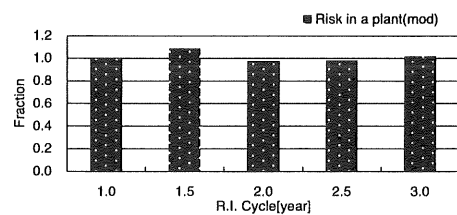


Fig7. Risk in a plant

#### 参考文献

- [1] 桐本 順広、松崎 章弘、佐々木 亨： "原子力発電所に関する確率論的安全評価用の機器故障率の算出(1982年度~1997年度 16カ年 49基データ 改訂版)" (2001) p.97-101
- [2] 三根 久、河合 一： "信頼性・保全性の基礎数理" 日科技連(1984) p.9
- [3] (社)日本原子力学会： 日本原子力学会誌 Vol.44, No.4 (2002) p.18
- [4] (社)日本機械学会 RC198： 軽水型原子力発電所保全研究分科会(フェーズ 3)中間報告書 (2003) p.53
- [5] 豊田 正敏、湯原 裕、水野 勝巳、桑島 謙臣： "原子力発電技術読本" オーム社(1976) p205
- [6] 科学技術振興機構： 原子力百科事典 ATOMICA "発電原価", [http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/dic\\_0704\\_01.html](http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/dic_0704_01.html)
- [7] (社)日本原子力産業会議： 原子力産業新聞(第2018号) (1999), p.1
- [8] 科学技術振興機構： 原子力百科事典 ATOMICA (15-01-03-03), [http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/15010303\\_1.html](http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/15010303_1.html)
- [9] 塩見 弘： "人間信頼性工学入門" 日科技連(1996) p.109