

# 原子力プラントにおける保全計画の最適化手法の構築

Development of an evaluation method for optimization of maintenance strategy in commercial plant

東北大学大学院工学研究科	伊藤 悟	Satoshi ITO	Non Member
東北大学大学院工学研究科	白石 夏樹	Natsuki SHIRAISHI	Member
東北大学大学院工学研究科	結城 和久	Kazuhisa YUKI	Non Member
東北大学大学院工学研究科	橋爪 秀利	Hidetoshi HASHIZUME	Member

In this study, a new simulation method is developed for optimization of maintenance strategy in NPP as a multiple-objective optimization problem (MOP). The result of operation is evaluated as the average of the following three measures in 3,000 trials: Cost of Electricity (COE) as economic risk, Frequency of unplanned shutdown as plant reliability, and Unavailability of Regular Service System (RSS) and Engineering Safety Features (ESF) as safety measures. The following maintenance parameters are considered to evaluate several risk in plant operation by changing maintenance strategy: planned outage cycle, surveillance cycle, major inspection cycle, and surveillance cycle depending on the value of Fussel-Vesely importance measure. By using the Decision-Making method based on AHP, there are individual tendencies depending on individual decision-maker. Therefore this study could be useful for resolving the problem of maintenance optimization as a MOP.

**Keywords:** Maintenance Strategy, Cost of Electricity, Unavailability, Decision-Making Method

## 1. 緒言

1995年の電気事業法の改正以降、電力の小売自由化が段階的に進んでおり、2007年度以降には全面自由化についての検討も開始される予定である[1]。このような電力自由化の流れの中で、原子力の高水準の安全性を維持しながらの価格競争力の維持、向上が電気事業者にとっての至上命題となっており、原子力発電所における「保全の最適化」を実施することにより、プラントライフを通じて総合的に安全性、信頼性および経済性の最適点を求めることが必要とされている。

これまで保全最適化問題に対して、様々な研究がなされてきた[2,3,4]。しかしながら、これまでは簡単なシステムに関する理論的な解析が主流であり、大規模かつ複雑なシステムに関する研究例は少ない。また、保全計画の変更が経済性、信頼性および安全性に与える影響の定量的な評価例は少なく、さらに保全におけるデメリット（分解点検後の初期故障発生、動作試験によるストレスの蓄積）に着目したモデルの例は見受けられない。

以上の背景のもと、本研究では特に原子力発電所の保全最適化問題を多目的最適化問題として解くため、保全計画の変更にとまらぬ安全性、信頼性、経済性と

いった項目の変化の相関を、同時かつ定量的に算出し、評価するための手法を構築する。さらに意思決定手法を用いることで、保全計画の決定を司る意思決定者の経験や主観的な判断が反映された、最適な保全計画の選定が可能となる手法を得る。

## 2. 評価対象のモデル化

### 2.1 評価対象とシステム構成

本研究では、BWRを評価対象とし、シュミレーションモデルの構築を行う。原子力発電所は大きく分けて蒸気タービンを回転させ発電を行う常用運転系（RSS: Regular Service System）と事故やトラブル発生時に、プラントの運転を安全に停止させる役割を果たす工学的安全設備（ESF: Engineering Safety Features）の2つのシステムによって構成されているとする。本研究で評価対象とする構成サブシステムを表1に示す。

### 2.2 Fault Treeによるシステム構造の図式化

本研究ではシステムのモデル化にあたり、Fault Tree Analysis (FTA) を用いて評価を行う。FTにおける頂上を引き起こすイベントの最小単位である Minimal Cut Set (MCS) として、本研究では、以下の3種類を取り扱う（図1に概念図を示す）。

連絡先:伊藤悟、〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01-2、東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻、電話: 022-795-7906、  
e-mail:satoshi.ito@qse.tohoku.ac.jp

表 1. 各サブシステムにおける機器数

常用運転系(RSS): 7系統		工学的安全施設(ESF): 7系統	
主蒸気系	12	自動減圧系・主蒸気隔離弁	8
原子炉再循環系	22	非常用 D/G	9
制御棒駆動系	24	高圧炉心スプレー系	16
復水・給水系	33	低圧炉心スプレー系	12
タービン設備	20	残留熱除去系 A 系統	14
原子炉冷却材浄化系	18	残留熱除去系 B・C 系統	19
原子炉補機冷却系	22	非常用ガス処理系	14
計	151	計	92
構成機器数合計			243

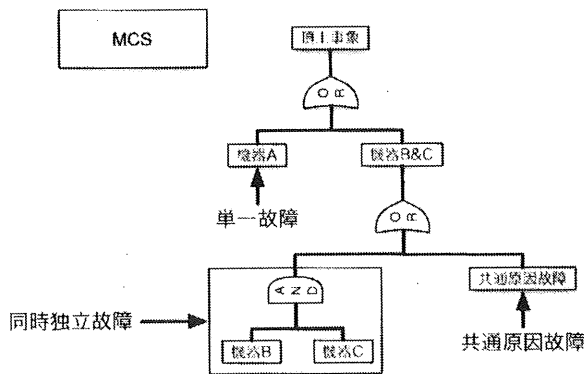


図 1. MCS

- 単一故障：単一の機器が故障する事象
- 同時独立故障：冗長化された機器群を構成する各機器が、同時かつ独立に故障する事象
- 共通原因故障：冗長化された機器群が作業員の操作ミスなどを原因に、同時に故障する事象

本研究ではサブシステムのいずれか 1 つが停止した場合に、システム全体を停止させると仮定し、RSS、ESF の FT を設定している。

### 2.3 機器の故障発生シミュレーション

時間故障率は初期故障、偶発故障、磨耗故障に分かれるバスタブ曲線によって表現できるとされている。本研究では磨耗故障は考慮しないと仮定する。図 2 に定検終了後のプラント起動以降の計画外停止の発生時期を示す。プラントの計画外停止は定検終了後最初の 1 ヶ月に多く発生していることがわかる。本研究では、

この要因を分解点検により機器の故障率がバスタブ曲線の初期故障期間に転移するためであると仮定する。Fig. 2 より、定検終了後最初の 1 ヶ月の計画外停止回数は、2 ヶ月目行こうの計画外停止回数の平均値に比べて約 3.4 倍高いと読み取れる。したがって、本研究では定検実施後最初の 1 ヶ月は、機器故障率が従来の 3.4 倍高くなるとモデル化する。この際、2 ヶ月目以降の時間故障率は約 0.78 倍と補正される。図 3 に初期故障を考慮した場合の時間故障率の時系列分布を示す。

機器故障の発生は偶発的であり、その故障の発生時期は一定ではない。そこで、本研究では機器故障の偶発性を再現する手法としてモンテカルロ法によるシミュレーションを行う。タイムステップ当りの FT の MCS の発生期待値と擬似乱数の値の大小を比較し、乱数がタイムステップ当りの MCS の発生期待値よりも小さくなった場合に故障が発生したと判定する。RSS の機器の故障の評価には前述した 3 種類の MCS を用い、その発生期待値  $m$  は以下のように取り扱う。

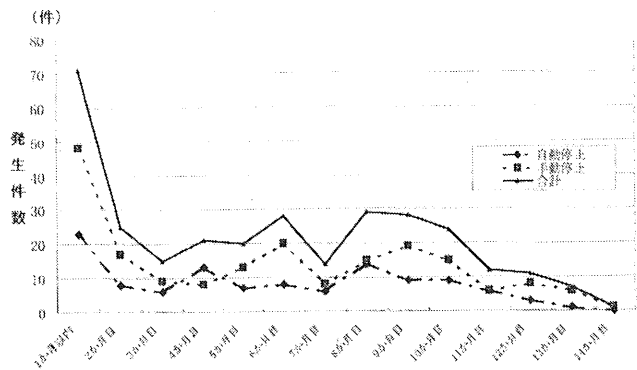


図 2. 定検後の計画外停止発生時期

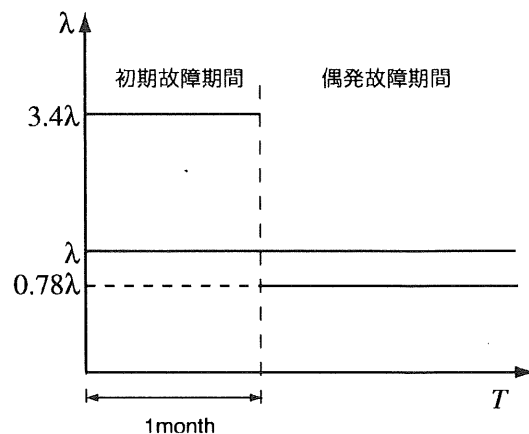


図 3. 時間故障率の時系列分布

- 単一故障

時間故障率 $\lambda$ の機器 A 単体によるタイムステップ $\tau$ 当りの単一故障の発生期待値  $m$  は以下で与えられる。

$$m = \lambda\tau \quad (1)$$

- 同時独立故障

時間故障率 $\lambda$ の機器 A を 2 機用いて冗長化された機器群のタイムステップ $\tau$ 当りの同時独立故障の発生期待値  $m$  は以下で与えられる。

$$m = (\lambda\tau)^2 \quad (2)$$

- 共通原因故障

時間故障率 $\lambda$ の機器 A を 2 機用いて冗長化された機器群のタイムステップ $\tau$ 当りの共通原因故障の発生期待値  $m$  は共通故障の発生確率である $\beta$  を用いて以下で与えられる。

$$m = \beta\lambda\tau \quad (3)$$

また ESF の機器は時間依存の故障に加えて動作要求 (デマンド) があつた場合にも故障が発生するとモデル化し、定例試験時の故障発生シミュレーションにはデマンド故障率を用い、デマンド故障率と擬似乱数の値の大小を比較することで評価を行う。

## 2.4 保全活動のモデル化

保全活動の種類として、定期検査、分解点検・分解検査、定例試験・機能試験が挙げられる。

- 定期検査

本研究ではシミュレーションに際して、毎年 1 回の定期検査の実施を仮定する。停止期間は表 2 に示されるように、分解検査および分解点検の実施機器数に応じて変化すると仮定する。

- 分解点検・分解検査

本研究では各機器の分解点検の実施周期を表 3 に示すように設定する。本研究では分解点検の実施により機器の性能は新品同様に回復するが、その一方で初期故障モードに転移すると仮定する。

表 2. 分解点検機器数と定検停止期間の関係

全機器数に対する分解点検機器数の割合 $N$	停止期間
$N < 25\%$	45 日
$25\% \leq N < 50\%$	90 日
$50\% \leq N < 75\%$	120 日
$75\% \leq N$	180 日

表 3. 分解点検の実施周期

	分解検査 要求機器		その他機器	
	なし	あり	なし	あり
冗長化	なし	あり	なし	あり
実施周期[定検]	1	2	2	3

- 定例試験・機能検査

定例試験は通常待機状態にある ESF の機器に対する定期的な作動試験である。本研究では定例試験の実施日程が集中しないように試験の時期をずらす。定例試験および機能検査の実施により機器の健全性は向上するが、その一方で動作による負荷が機器に蓄積すると仮定する。

## 2.5 機器故障発生時のイベントのモデル化

本研究では RSS の構成機器に故障が発生した場合、その機器の補修のためにプラントの運転を停止させると仮定する。このとき ESF の全ての機器に対して、プラントの安全停止のための機能を有しているかどうかを評価するためにモンテカルロ法により動作確認の評価を行う。プラントの計画外停止期間は表 4 に示すように、ESF のサブシステムの故障数に応じて変化すると仮定する。また、ESF 構成機器の定例試験時に起動失敗などの故障が発生した場合、当該機器の補修のためにプラントの運転を 1 週間停止させると仮定する。

## 2.6 シミュレーションのフローチャート

図 4 にモンテカルロシミュレーションのフローチャートを示す。図 4 に示す手順を経過時間が 30 年に至るまで実施し、この操作を 3000 回試行する。そして 3000 回の試行で得られた結果の平均値を評価する。

表 4. RSS 故障時の ESF サブシステム故障数と計画外停止期間の関係

故障数	停止期間	故障数	停止期間
0	15 日	4	1.5 年
1	45 日	5	2 年
2	0.5 年	6	3 年
3	1 年	7	4 年

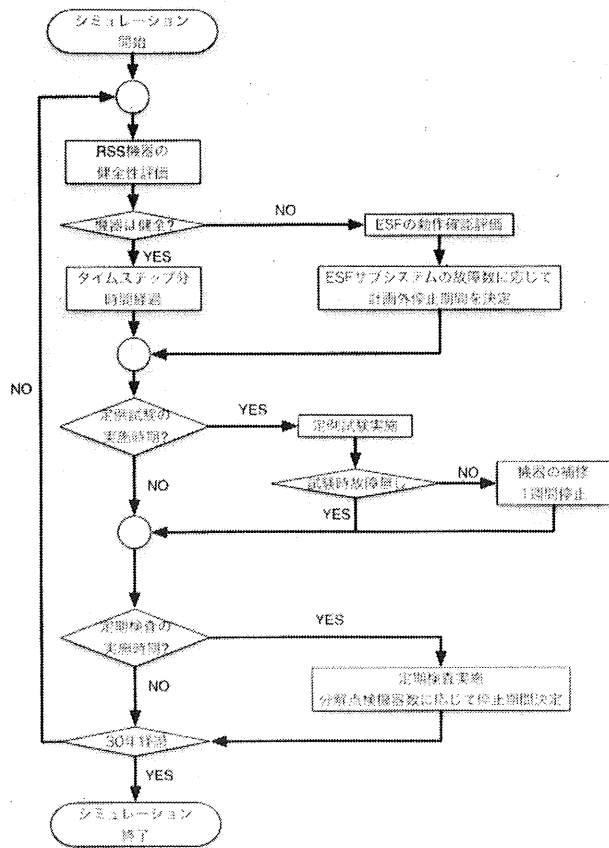


図4. シミュレーションのフローチャート

### 3. 運転評価指標の定式化

#### 3.1 発電コスト

本研究では経済性の指標として発電コストを評価する。発電コスト (COE: Cost Of Electricity) は発電を行うための費用単価である。本研究では、燃料コスト、建設コスト、年経費率が一定であると仮定し、COE を以下のように簡単化する。

$$COE = \frac{Const.}{A} \quad (4)$$

ただし  $A$  は時間稼働率である。時間稼働率は運転期間における稼働時間の割合を示す。

#### 3.2 計画外停止頻度

計画外停止頻度  $N$  はプラントの稼働時間におけるプラントの計画外停止回数を表す。計画外停止頻度は信頼性の指標と考えられる。

### 3.3 Unavailability

Unavailability はシステムの非信頼度 (Unreliability) の時間平均を表し、本研究では安全性の指標として用いる。機器の Unavailability は以下の式で表される。

$$U = \frac{\int F(t)dt}{\int dt} = \frac{\int \{1 - \exp(-\lambda t)\} dt}{\int dt} \approx \frac{1}{2} \lambda t \quad (5)$$

ただし、 $F(t)$  は非信頼度関数である。本研究では図5に示すように、Unavailability を離散的に扱うものとする。なお Unavailability は故障判定の場合と同様に MCS 単位で算出する。

### 3.4 保全活動と Unavailability

機器に対して定例試験や分解点検といった保全活動を行うと機器の信頼性は向上し、それにともない Unavailability は低減されると考えられる。本研究では保全活動が Unavailability に与える影響を以下のようにモデル化する。

#### • 定例試験・機能検査

まず、時間依存とデマンド依存の両方が故障イベントとして扱われている機器については時間依存の故障とデマンド依存の故障は半々であったと仮定する、すなわち、時間故障率およびデマンド故障率に対して0.5倍の補正を施す。2つ目にデマンド故障率が動作試験ごとに蓄積するという仮定をもとに、動作試験1回あたりの蓄積故障率  $\lambda_{accumulate}$  を算定する。従来の運転では1年の運転期間中に動作試験を12回実施する。運転開始後最初の動作試験を実施すると次の定検までの11ヶ月そのストレスが蓄積することになる。1年間の運転期間中に蓄積するストレスは12回分のほぼ半分である6回分の蓄積ストレスとなる。この蓄積ストレスと補正されたデマンド故障率  $0.5\lambda_d$  が等しいことから、求める蓄積故障率  $\lambda_{accumulate}$  は  $1/12\lambda_d$  となる。

#### • 分解点検・分解検査

分解点検および分解検査の実施により、機器の性能は新品同様に回復すると仮定し、Unavailability は運転開始時の状態にリセットされる。しかしながら分解点検後の機器の故障モードは初期故障に転移すると仮定しているため、再起動以降最初の1ヶ月は故障率が3.4倍高くなる。またESFの中でも定例試験の対象となっている機器については、分解点検後最初の定例試験の実施まで初期故障モードのままであると仮定する。

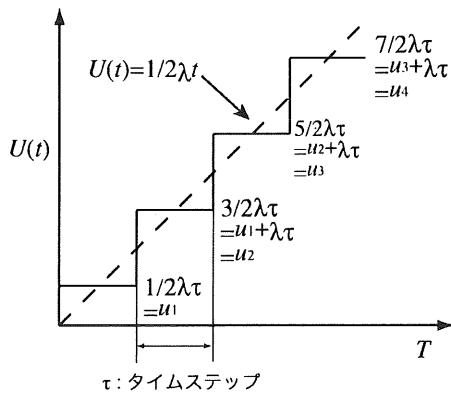


図 5. Unavailability の離散化

## 4. シミュレーション結果

### 4.1 保全に関するパラメータの設定

定期検査の実施周期は現行では 12 ヶ月であり、米国において実績を残している 18 ヶ月～24 ヶ月への延長を検討している[5]ことから 12 ヶ月、18 ヶ月、24 ヶ月としている。定例試験の実施周期については、現行の 1 ヶ月、米国 ASME が規定する 3 ヶ月、そして定期検査まで試験を一度も実施しない場合の 3 パターンについて、分解点検周期については、2.4 でモデル化した分解点検周期、その 2 倍、3 倍の 3 パターンについてシミュレーションを行う。

また、機器重要度に応じた定例試験の実施による運転評価指標の変化についても評価する。機器重要度を示す Fusseil-Vesely (FV) 重要度は機器の Unavailability とシステム全体の Unavailability の比で表される。FV 重要度により、表 5 のように定例試験の実施周期を設定する。

### 4.2 保全パラメータを変更した場合の結果

表 6 に定検周期  $T_A$ 、定例試験周期  $T_B$ 、分解点検周期  $T_C$  をそれぞれ変更した場合の発電コスト、計画外停止頻度、ESF の Unavailability を示す。27 通りのパラメータについて得られた結果を比較すると、発電コストについては定検周期が長い場合に最もよい傾向が得られている。

表 5. FV 重要度と定例試験の実施周期

組合せ	$FV < 0.005$	$0.005 \leq FV < 0.01$	$0.01 \leq FV$
No.1	1 ヶ月	1 ヶ月	1 ヶ月
No.2	3 ヶ月	1 ヶ月	1 ヶ月
No.3	実施しない	3 ヶ月	1 ヶ月

また ESF の Unavailability は定検周期が短い場合にリスクの増加が少ないという結果が得られた。

表 7 に定検周期  $T_A$ 、機器重要度に応じた定例試験周期、分解点検周期  $T_C$  をそれぞれ変更した場合の発電コスト、計画外停止頻度、および ESF の Unavailability の変化割合を示す。こちらの場合で特筆すべき点は ESF の Unavailability の増加割合を低く抑えながらも計画外停止頻度および発電コストの低減を図れていることである。この結果から機器重要度に応じた定例試験の変更は安全性の大幅な低減というリスクを回避しつつプラントの信頼性および経済性の向上を図れるということが言える。

表 6. 定検周期、定例試験周期、分解点検周期を変更した場合の各評価項目の変化割合

保全計画案	COE	N	$U_{ESF}$
$T_A: 12m, T_B: \times 1, T_C: \times 1$	0.0%	0.0%	0.0%
$T_A: 12m, T_B: \times 3, T_C: \times 1$	0.0%	<b>-2.5%</b>	20.4%
$T_A: 12m, T_B: \times 0, T_C: \times 1$	0.0%	14.4%	674.1%
$T_A: 18m, T_B: \times 1, T_C: \times 1$	<b>-6.5%</b>	<b>-5.3%</b>	37.1%
$T_A: 18m, T_B: \times 3, T_C: \times 1$	<b>-6.5%</b>	<b>-6.4%</b>	50.3%
$T_A: 18m, T_B: \times 0, T_C: \times 1$	<b>-6.4%</b>	10.5%	1046.0%
$T_A: 24m, T_B: \times 1, T_C: \times 1$	<b>-10.1%</b>	<b>-7.9%</b>	71.6%
$T_A: 24m, T_B: \times 3, T_C: \times 1$	<b>-10.1%</b>	<b>-8.9%</b>	78.4%
$T_A: 24m, T_B: \times 0, T_C: \times 1$	<b>-10.1%</b>	9.0%	1388.1%
$T_A: 12m, T_B: \times 1, T_C: \times 2$	<b>-4.8%</b>	<b>-7.8%</b>	11.7%
$T_A: 12m, T_B: \times 3, T_C: \times 2$	<b>-4.8%</b>	<b>-9.7%</b>	17.0%
$T_A: 12m, T_B: \times 0, T_C: \times 2$	<b>-4.8%</b>	7.9%	645.2%
$T_A: 18m, T_B: \times 1, T_C: \times 2$	<b>-10.8%</b>	<b>-10.0%</b>	56.5%
$T_A: 18m, T_B: \times 3, T_C: \times 2$	<b>-10.8%</b>	<b>-11.4%</b>	50.2%
$T_A: 18m, T_B: \times 0, T_C: \times 2$	<b>-10.8%</b>	6.4%	984.6%
$T_A: 24m, T_B: \times 1, T_C: \times 2$	<b>-13.1%</b>	<b>-11.6%</b>	100.3%
$T_A: 24m, T_B: \times 3, T_C: \times 2$	<b>-13.1%</b>	<b>-13.2%</b>	82.5%
$T_A: 24m, T_B: \times 0, T_C: \times 2$	<b>-13.0%</b>	5.1%	1305.4%
$T_A: 12m, T_B: \times 1, T_C: \times 3$	<b>-7.4%</b>	<b>-10.6%</b>	27.0%
$T_A: 12m, T_B: \times 3, T_C: \times 3$	<b>-7.4%</b>	<b>-11.5%</b>	19.8%
$T_A: 12m, T_B: \times 0, T_C: \times 3$	<b>-7.4%</b>	5.9%	622.5%
$T_A: 18m, T_B: \times 1, T_C: \times 3$	<b>-11.1%</b>	<b>-11.2%</b>	83.2%
$T_A: 18m, T_B: \times 3, T_C: \times 3$	<b>-11.1%</b>	<b>-13.8%</b>	57.8%
$T_A: 18m, T_B: \times 0, T_C: \times 3$	<b>-11.1%</b>	3.2%	956.3%
$T_A: 24m, T_B: \times 1, T_C: \times 3$	<b>-14.2%</b>	<b>-12.0%</b>	131.1%
$T_A: 24m, T_B: \times 3, T_C: \times 3$	<b>-14.2%</b>	<b>-14.5%</b>	92.2%
$T_A: 24m, T_B: \times 0, T_C: \times 3$	<b>-14.2%</b>	1.4%	1258.0%

表 7. 定検周期、FV 重要度に応じた定例試験周期、分解点検周期を変更した場合の各評価項目の変化割合

保全計画案	COE	N	$U_{ESF}$
$T_A: 12m, FV: No. 1, T_C: \times 1$	0.0%	0.0%	0.0%
$T_A: 12m, FV: No. 2, T_C: \times 1$	0.0%	0.9%	-0.1%
$T_A: 12m, FV: No. 3, T_C: \times 1$	0.0%	-0.6%	5.0%
$T_A: 18m, FV: No. 1, T_C: \times 1$	-6.5%	-5.3%	37.1%
$T_A: 18m, FV: No. 2, T_C: \times 1$	-6.5%	-5.3%	36.9%
$T_A: 18m, FV: No. 3, T_C: \times 1$	-6.5%	-6.4%	40.3%
$T_A: 24m, FV: No. 1, T_C: \times 1$	-10.1%	-7.9%	71.6%
$T_A: 24m, FV: No. 2, T_C: \times 1$	-10.1%	-7.7%	71.2%
$T_A: 24m, FV: No. 3, T_C: \times 1$	-10.1%	-8.0%	73.0%
$T_A: 12m, FV: No. 1, T_C: \times 2$	-4.8%	-7.8%	11.7%
$T_A: 12m, FV: No. 2, T_C: \times 2$	-4.8%	-8.2%	11.3%
$T_A: 12m, FV: No. 3, T_C: \times 2$	-4.8%	-8.1%	9.1%
$T_A: 18m, FV: No. 1, T_C: \times 2$	-10.8%	-10.0%	56.5%
$T_A: 18m, FV: No. 2, T_C: \times 2$	-10.8%	-10.2%	55.9%
$T_A: 18m, FV: No. 3, T_C: \times 2$	-10.8%	-11.4%	49.0%
$T_A: 24m, FV: No. 1, T_C: \times 2$	-13.1%	-11.6%	100.3%
$T_A: 24m, FV: No. 2, T_C: \times 2$	-13.1%	-10.7%	99.4%
$T_A: 24m, FV: No. 3, T_C: \times 2$	-13.1%	-11.6%	87.8%
$T_A: 12m, FV: No. 1, T_C: \times 3$	-7.4%	-10.6%	27.0%
$T_A: 12m, FV: No. 2, T_C: \times 3$	-7.4%	-10.2%	26.4%
$T_A: 12m, FV: No. 3, T_C: \times 3$	-7.4%	-11.3%	17.5%
$T_A: 18m, FV: No. 1, T_C: \times 3$	-11.1%	-11.2%	83.2%
$T_A: 18m, FV: No. 2, T_C: \times 3$	-11.1%	-11.1%	82.1%
$T_A: 18m, FV: No. 3, T_C: \times 3$	-11.1%	-12.6%	64.5%
$T_A: 24m, FV: No. 1, T_C: \times 3$	-14.2%	-12.0%	131.1%
$T_A: 24m, FV: No. 2, T_C: \times 3$	-14.2%	-12.0%	129.8%
$T_A: 24m, FV: No. 3, T_C: \times 3$	-14.2%	-13.3%	106.4%

## 5. 意思決定手法による保全計画の選定

シミュレーションによって得られた大量のデータから最適な保全計画を決定するのは困難である。これらの大量のデータから保全計画を決定する意思決定者の意図に沿った最適な保全計画を抽出する手法としての例として意思決定手法を導入する。

意思決定手法の1つである Analytic Hierarchy Process を用いて、表 6、7 における保全計画のランキングをつけると、表 8 のようになる。このように意思決定手法による様々な評価指標の統合により、保全計画の検討における最適な計画案を明示することが可能となる。

表 8. 意思決定手法に基づく保全計画案全 54 案のランキング上位 5 位

順位	保全計画案	意思決定指標[%]
1	$T_A: 12m, FV: No. 1, T_C: \times 1$	0.0
2	$T_A: 12m, FV: No. 2, T_C: \times 1$	0.1
3	$T_A: 12m, FV: No. 3, T_C: \times 2$	1.6
4	$T_A: 12m, FV: No. 3, T_C: \times 1$	2.4
5	$T_A: 12m, FV: No. 2, T_C: \times 2$	2.7

## 3. 結言

本研究では、原子力発電プラント(BWR)の保全最適化の検討および評価を行うためにモンテカルロ法を用いた modeling&simulation を実施し、システムおよび機器の動作を確率的に評価する手法を構築した。本手法において発電コストや計画外停止頻度などの評価指標を定式化し、保全活動の変更による評価指標の変化割合を評価することで保全計画の変更の有効性を議論可能な結果を得た。そして多種多様な保全計画案から得られた大量のデータから意思決定者の意向に基づいた保全計画を選定する手法の一例として意思決定手法を適用し、その有効性を検討した。本手法により原子力発電における保全最適化問題の多角的な検証および保全計画の決定における判断材料の提供が可能であると考えられる。

## 参考文献

- [1] 築館 勝利, “日本の電気事業制度について (<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/yuseimineika/dai4/>)”, 郵政民営化に関する有識者会議第 4 回会合資料。
- [2] Ton Jiejuan, Mao DIngyuan, Xue Dazh "A genetic algorithm solution for a nuclear power plant risk-cost maintenance model" Nuclear Engineering and Design, Vol.229, 2004, pp.81-89.
- [3] Sebastia'n Martorell, Ana Sa'nchez, Sofi'a Carlos, Vicente Serradell "Alternatives and challenges in optimizing industrial safety using genetic algorithm" Reliability Engineering and System Safety, Vol.86, 2004, pp.25-38.
- [4] R.Bris, E. Chatelet, F.Talaoui "New method to minimize the preventive maintenance cost of series-parallel systems" Reliability Engineering and System Safety, Vol.82, 2003, pp.247-255.
- [5] (財)電力中央研究所, “「エネルギーの将来を考える」-強靱なエネルギー政策を求めて-” pp.19.