

プラント機器の取替・点検周期の最適化

- Optimization on Replacement and Inspection Period of Plant Equipment -

普遍学国際研究所 高瀬 健太郎 Kentaro TAKASE Member
秋田県立大学 笠井 雅夫 Masao KASAI Member

Rationalization of the plant maintenance is one of the main topics being investigated in Japanese nuclear power industries. Optimization of the inspection and replacement period of equipments is effective for the maintenance cost reduction. The more realistic model of the replacement policy is proposed in this study. It is based on the classical replacement policy model and its cost is estimated. Then, to consider the inspection for the maintenance, the formulation that includes the risk concept is discussed. Based on it, two variations of the combination of the inspection and the replacement are discussed and the costs are estimated. In this study the effect of the degradation of the equipment is important. The optimized maintenance policy depends on the existence of significant degradation.

KeyWords : maintenance, optimization of replacement period, preventive replacement, corrective replacement, inspection, risk, degradation of the equipment

1. 序

原子力発電では、安全性は最も重要なポイントであり、従来、我が国の原子力プラントの保全是、非常に保守的に実施されてきた。プラントの運転経験が浅く、各種の劣化やトラブルに関する知識、情報が不足していた時代においては至極当然であったが、プラントの運転経験も蓄積し、諸外国ではリスクベースの保全が取り入れられている昨今では、電力の自由化の流れとも相俟って、過度とも言える従来の保全活動を見直し、安全性を損なわずに保全を合理化し、安価で信頼性の高い電力を国民に供給する必要性が生じている。

過剰な予防保全是保全活動の資源を有効利用してい

ないばかりか、ヒューマン・エラーの増加による信頼性低下をもたらす恐れもあり、原子力プラントの保全合理化の重要性が叫ばれている^{(1), (2), (3)}。

このような認識のもとに保全の合理化、適正化が検討されている。従来保全における問題点の一つとして、劣化による機器の故障を恐れ過ぎるあまり、機器の寿命を十分に把握することなく必要以上に早く新品に取替えてしまう過度の予防保全が挙げられる。また機器の重要度を適切に考慮せずに重要な機器にもそうでない機器にも同様に保全資源を投入している場合もある。

実際、こうした問題点に対するアプローチとしては、既に米国を始めとする諸外国において取り入れられつつあるRCM (Reliability Centered Maintenance) やPSA (Probabilistic Safety Assessment) 手法等がある⁽⁴⁾。

文献(5)に基づいて、文献(6)では3種類の取替政策、即ち機器が故障したら事後取替を行い、機器が故障しない場合には、一定の年齢(作動期間)に達したときに予防取替を行う「年齢取替政策」、予防取替は予め定めた時期が来たときに行う「定期取替政策」、予防取替の時期は定期取替と同じだが、機器が故障し

◆連絡先：笠井 雅夫

〒015-0055 本荘市土谷字海老ノ口84-4
秋田県立大学 システム科学技術学部
電子情報システム学科
e-mail : kasai@akita-pu.ac.jp

た場合、事後取替の代わりに応急修理で対応する「小修理取替政策」について議論され、これらの取替政策について最適な取替周期が求められた。実際の原子力プラントでは、予防取替は定検時に行われるが、予防取替直前に機器が故障し事後取替が行われた場合、直後の予防取替は省略されるのが一般的である。本稿では、このような実態を考慮に入れた取替政策モデルを構築し、文献(6)で検討された議論を更に深めるとともに、新たに機器の「点検周期」の最適化についても議論する。

2. プラント機器の取替政策

上に述べたように、文献(6)では、年齢取替、定期取替、小修理取替の各取替政策の下での取替周期の最適化モデルを検討し、それぞれの取替政策間の得失等について議論した。しかし、実際のプラントにおける機器の取替のパターンは、必ずしもこれらの取替政策に帰着出来るものではない。ここでは、より実際の取替パターンに近い取替政策を考え、その取替政策の下での取替周期最適化について議論する。

2-1) 取替政策のバリエーション

まずここで保全の対象とする機器とそれに対して実施する保全政策の特徴についてまとめておく。

- (1) 機器は故障時にその機能喪失に伴う検知可能な異常を示し、それによって「ただちに」故障が発見されるものとする。後述の「点検」の概念は「ただちに」は故障が発見されない場合に必要となる。
- (2) また、機器の故障が発見された場合にはそれを放置することなくただちに機器の取替を実施するものとする。

(2)の機器故障時の取替を以後「事後取替」と呼ぶ。これに対して機器が故障する前に予防的に取替を実施することを「予防取替」と呼ぶ。(2)において当面は取替を行わずに修理を施し、当該機器を使い続け、ある時期まで使用した後に改めて取替を実施する政策も考えられる。これは「小修理取替政策」と呼ばれる。

機器の故障率が機器の使用時間によらず一定の場合、その故障は「ランダム(偶発)故障」と呼ばれる。「ランダム故障」の場合、次のある期間内に機器

が故障する可能性はその機器のそれまでの使用時間によらない。

つまり機器は今後の故障確率に関しては新品である場合も古い場合も区別されない。この場合、予防的に機器を取り替えることには実効的な意味はなく、従って(1)(2)の条件下において有効な保全政策は「事後取替政策」のみとなる。本稿では「事後取替政策」については議論しないので機器の特徴として以下を追加する。

- (3) 機器の故障率はその使用時間によって変化する。

さて問題はいつ「予防取替」を実施すべきか、ということになる。機器の取替がいつでも実施可能でその取替コストに時間的な影響がない場合には「年齢取替政策」が有効である。「年齢取替政策」では予め一つの機器の使用期間を決めておき、その期間を使いきたら予防取替を実施する。期間中に故障した場合にはもちろん事後取替を行う(図-1参照)。

ある種の機器では、それに対する「予防取替」を行う際に周辺他の機器に対する保全も同時に実施する場合がある。これは複数機器の保全を同時に実施することによって保全に掛かる総費用を削減できるためである。例えば作業員の人件費や当該箇所を停止させることによって発生する損失額などの節約効果である。

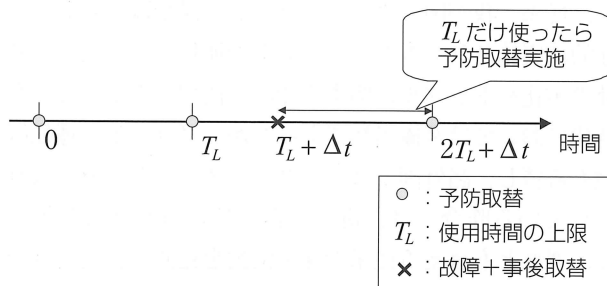


図-1 Age-based replacement policy

このような場合には予防取替の実施時期を定期的に設定しておき、複数機器の保全をその時期に集中して実施することになる。実際にはこれはプラントの定期検査の時期と一致し、各機器の取替は数回の定期検査に一回といった具合に実施される。

ここで機器が故障した場合に前述の(2)を適用することを考えてみる。当該機器の事後取替はプラントの停止をとまわずに実施されるとする。そして次回の定期取

替の時期に再び取替を実施し、以前と同じサイクルを繰り返すことになる。これを定期取替政策と呼ぶ。

保全実施体制やトラブル対応費用に関連して通常、事後取替にかかる費用は予防取替にかかる費用に比べて高くなる。

図-2 に定期取替政策における定期取替と事後取替の様子を示す。ここで T_M は定期取替周期を表す。

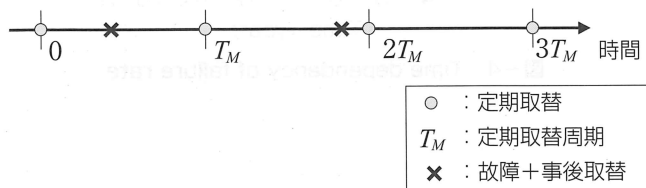


図-2 Time based replacement policy

ここではこの機器の事後取替にともなうプラントの停止はないものとしたが、プラントを停止させる必要がある場合には、通常、以降の定期取替の時期をそのプラント停止期間に合わせてシフトさせることになる。(図-2では機器の事後取替の有無によらず定期取替の時期は変わらないことに注意。)この場合のコスト評価は「年齢取替政策」(図-1参照)に準ずることになる。

「小修理取替政策」、「年齢取替政策」、「定期取替政策」については文献(6)において議論がなされておりここではこれ以上議論しない。

定期取替政策では故障及び事後取替の有無に関わらず予め定められた時期に必ず定期取替を実施する。ところで定期取替実施時期の“直前”に機器が故障して事後取替が行われていた場合には、来る定期取替実施時期にはその機器は新品同様の状態である。これに対して一律に予防取替を実施することはいかにも非経済的である。

しかしながら、ここでいう“直前”とは次回定期取替のどの程度前の時期を指すのか。ここで「定期取替政策」を改良した「修正定期取替政策」を提案し、その中でこの問題について考えてみることにする。

「修正定期取替政策」では定期取替周期 T_M に加えて許容期間 T_A を定義する。機器の故障(及び事後取替)の時点から次の定期取替の時期まで T_A 以下の時間しか経過しない場合にはその機器の次回定期取替はキャンセルすることにする(図-3参照)。

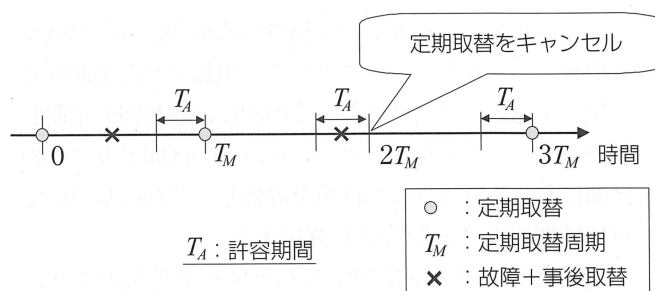


図-3 Modified time based replacement policy

次節ではこの「修正定期取替政策」について評価を行い、許容期間 T_A について議論する。

2-2) 修正定期取替政策における最適化

修正定期取替政策において定義した許容期間 T_A について考えてみる。 $T_A \rightarrow 0$ とした場合には修正定期取替政策は定期取替政策と一致し、定期取替実施直前に機器が故障した場合に経済的なロスが生じる。

逆に $T_A \rightarrow$ 定期取替周期 T_M とした場合には、故障が生じて事後取替を実施した時にはいつでも次の定期取替がキャンセルされる。もし、これが $0 \leq T_A \leq T_M$ のうち最も合理的な T_A だとすると、定期取替直後に故障が生じ、事後取替を行った場合でさえ次回定期取替をキャンセルした方がよいということになる。定期取替によって機器が新品になるのもその直後の事後取替によって新品になるのもその後の機器の故障確率に差異はないのだから、このことは実は次回定期取替実施自体がもともと合理的でなかったことを意味する。この場合には、定期取替周期の延長について検討する必要がある。

ここで本政策実施時にかかるコストを評価する。評価に必要なパラメータは定期取替周期 T_M 、許容期間 T_A に加えて予防取替費用 C_p 、事後取替費用 C_r である。

また機器故障率の使用時間に対する依存性も必要である。評価するのはコストの時間平均の期待値である。

まず、コスト算出の定式化について、その基本概念を述べる。本政策においては次の定期取替の時期まで T_A 以下の時間しかない時期での機器の故障についてはその機器の次回定期取替はキャンセルされるが、これが連続して起こることによって定期取替のキャンセルが数回続けて起こる場合が考えられる。そこでまず連続してキャンセルされる定期取替の回数の期待値を算出する。キャ

ンセルされずに定期取替が実施される場合にはその機器は取替えられ新品となることから、実施された定期取替と次に実施された定期取替（その間には複数回の定期取替のキャンセルが存在し得る）を一つの区間とみてその区間におけるコストの期待値を評価し、それに基づいて単位時間当たりの期待値を算出する。

例題としてコストに関するパラメータを次のように設定した。

- 予防取替費用 C_p : 10万円
- 事後取替費用 C_r : 50万円

機器の非信頼度関数（故障時間分布関数ともいう） $F(t)$ としてはワイブル分布関数を用いた。故障率 $\lambda(t)$ の使用時間 t に対する依存性が t のべき乗になっているのが特徴である。ここでは各パラメータを次のように設定した（ t の単位は年）。

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{10}\right)^{2.2}\right)$$

$$\lambda(t) = \frac{2.2}{10} \left(\frac{t}{10}\right)^{1.2} \quad (1)$$

図-4、5に故障率と非信頼度関数の時間依存性を示す。図-4における故障率の増加は冒頭(3)で述べた機器の故障率時間変化に対応している。

以上のパラメータを用いて定期取替周期 T_M 、許容期間 T_A を変化させ、コストの時間平均の期待値を算出した。図-6は $T_M=10$ 年とした場合のコストの T_A 依存性であり、 $T_A \approx 2$ 年のときにコストが最小になるのがわかる。

図-7はそれぞれの T_M において T_A について最小化されたコストである。これらの結果からコストの時間平均の期待値は $T_M \approx 5$ 年、 $T_A \approx 2.5$ 年（つまり5年毎に定期取替を実施、ただしその半分の期間以降に機器が故障して、事後取替を行った場合には次の定期取替はキャンセルする。）のときに年間で平均約38万円に最小化されることが分かった。

本例題においては定期取替周期 T_M 、許容期間 T_A によってコストが最小化されたが、一般には $T_M \rightarrow \infty$ とした方が良い場合が存在し、この場合には事後取替が最適な保全政策となる。

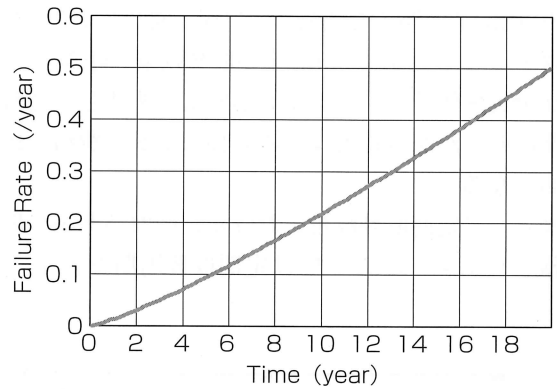


図-4 Time dependency of failure rate

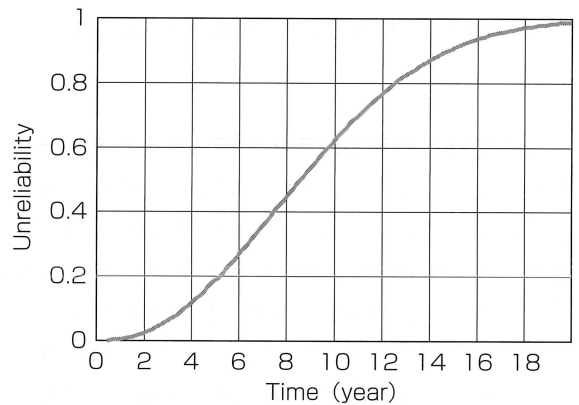


図-5 Time dependency of unreliability

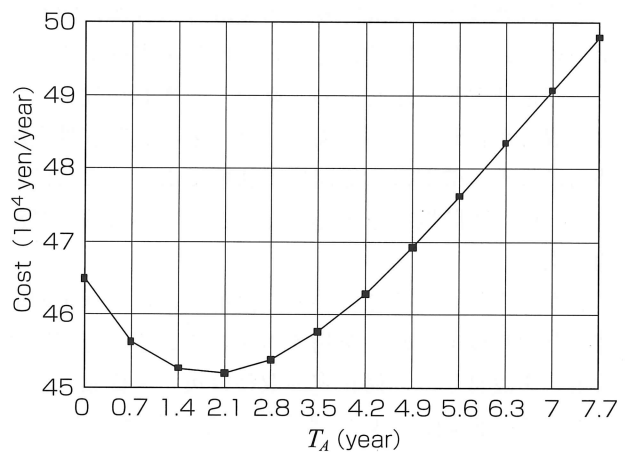


図-6 Expected value of cost vs. allowable span (Interval of periodic replacement is 10 years.)

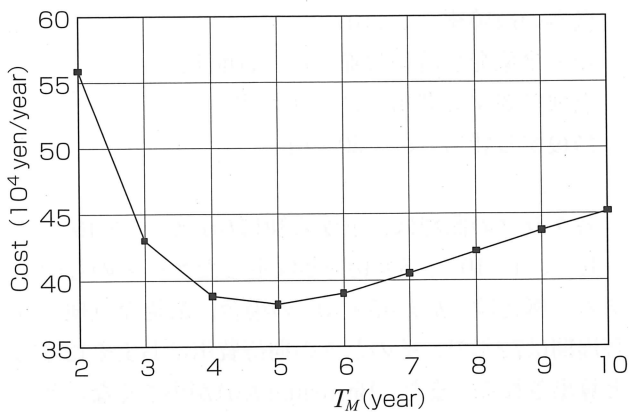


図-7 Expected value of cost vs. replacement interval (Allowable span is optimized at each interval, T_M .)

3. 点検/取替周期の最適化

取替問題では、機器の故障はいつ発生しても常時発見可能である事が前提であった。機器が故障した時、その機器の故障が直ちに判る場合には、その機器を修理あるいは取替えることが出来よう。しかし、一般的には、機器が故障しても点検するまで故障が判らない場合がある。待機系の機器はこのような機器の典型的な例であろう。また、機器の故障を発見するための監視に要する費用が高く常時監視することが経済的でない場合も考えられる。待機系の機器等、点検により初めて故障が発見されるケースは少なくない。ここでは、このように、機器の故障が点検によってのみ発見できる場合の最適な点検周期を求めるところを検討する。

3-1) 劣化を伴う機器の点検/取替周期最適化

プラント機器の場合、オンラインメンテナンスが可能な機器を除いて、往々にして点検時にプラントの運転を停止する必要がある。このような場合、機器の点検は、予め定められた時期に行われる定期点検時にまとめて実施されるのが普通である。定期点検時に行われる点検では、分解点検を伴うことが多く、その場合、点検費用が高くなるため、点検と同時に機器の部品等を取替えてしまうことが多い。ここでは、このように、点検時に機器の部品等を取替えてしまうことを想定する。このような保全政策を点検/取替政策と呼ぶこととし、このような場合の最適な点検/取替間隔を求める問題の定式化を行う。

点検周期の間隔 T の間、当該機器が故障することなく作動する確率は $R(T)$ である。この点検周期間のリスクは、当該機器が故障していない場合の頂上事象発生確率 $g(0_i, q')$ を用いて、 $T \cdot g(0_i, q')$ と書ける。したがって、点検周期の間隔 T の間、当該機器が故障することなく作動した場合の期待リスクは、 $T \cdot R(T) \cdot g(0_i, q')$ となる。ここで $g(0_i, q')$ は当該機器が故障していない場合の頂上事象発生確率であり、 0_i は当該機器が故障していない状態を示し、 q' は残りの機器の故障確率をベクトルの形で表現したものである。

一方、当該機器が間隔 T 内の時間 t に故障したとすると、故障前および故障後の総リスクは、それぞれ $t \cdot g(0_i, q')$ および $(T-t) \cdot g(1_i, q')$ と書ける。ここで、 $g(1_i, q')$ は当該機器が故障している場合の頂上事象発生確率であり、 1_i は当該機器が故障している状態を示している。また、当該機器が間隔 T 内の時間 t まで故障せず、 t と $t + \delta t$ の間で故障する確率は、 $R(t) \lambda(t) \delta t = f(t) \delta t$ である。

従って、頂上事象が発生した場合の諸処の費用を C_T とすると、総リスク C_{rsk} は下式のようにまとめられる。

$$\begin{aligned}
 C_{rsk} &= C_T g(1_i, q') \int_0^T (T-t) f(t) dt \\
 &\quad + C_T g(0_i, q') \int_0^T t \cdot f(t) dt \\
 &\quad + C_T g(0_i, q') \cdot T \cdot R(T) \\
 &= C_T I_B(i) \int_0^T F(t) dt + C_T g(0_i, q') \cdot T
 \end{aligned} \tag{2}$$

ここで、 $I_B(i)$ は、Birnbaumの重要度である。

点検費用を C_c 、点検により発見された機器の故障を修復する費用を C_r とすると、単位時間当たりの期待費用 $C(T)$ は下式で表される。

$$C(T) = \frac{C_T I_B(i) \int_0^T F(t) dt + C_c + C_r}{T} + C_T g(0_i, q') \tag{3}$$

(3)式の右辺第1項の分子の第2項、第3項は、点検周期毎に行われる1回の点検と1回の取替の費用を意味している。また、(3)式の第2項は、当該機器の点検・取替周期の最適化には関係しない定数項である事を考え、以下、この項を除いた下式で考えることとする。

$$C_i(T) = C(T) - C_T g(0_i, q') = \frac{C_T I_B(i) \int_0^T F(t) dt + C_c + C_r}{T} \tag{4}$$

最適な点検周期は上式が最小となる T であるから、上式を T で微分して 0 と置くと下式を得る。

$$C_{rI_B}(i) F(T) T + C_r T f(T) - C_{rI_B}(i) \int_0^T F(t) dt - C_c - C_r F(T) = 0 \quad (5)$$

即ち、

$$\{C_{rI_B}(i) T - C_r\} F(T) + C_r T f(T) - C_{rI_B}(i) \int_0^T F(t) dt = C_c \quad (6)$$

機器の故障時間分布 $F(T)$ をワイブル分布とした場合についてサンプル計算をする。

(6) 式を (7) 式のように変形する。

$$\left\{ T - \frac{C_r}{C_{rI_B}(i)} \right\} F(T) + \frac{C_r}{C_{rI_B}(i)} T f(T) - \int_0^T F(t) dt = \frac{C_c}{C_{rI_B}(i)} \quad (7)$$

ワイブル分布による故障時間分布関数およびその密度関数は下式のように表される。

$$F(t) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{t}{t_0} \right)^m \right\} \\ f(t) = \left(\frac{m}{t_0} \right) \left(\frac{t}{t_0} \right)^{m-1} \exp \left\{ - \left(\frac{t}{t_0} \right)^m \right\} \quad (8)$$

このワイブル分布を用いて、(4) 式で表される期待費用 $C_i(T)$ を求めた結果を図-8 に、Birnbaum $I_B(i)$ をパラメータとして示す。

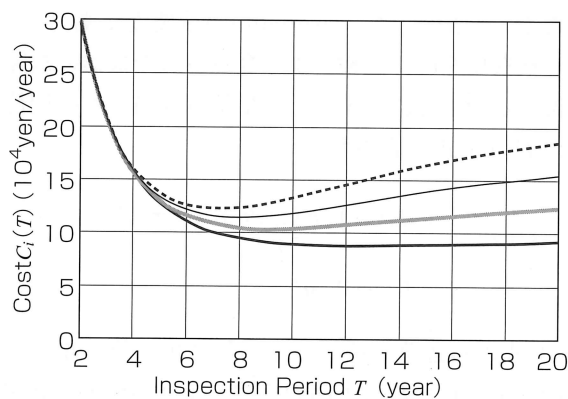


図-8 $C_i(T)$ vs. interval of inspection/replacement T

ワイブル分布のパラメータは、 $t_0 = 75,000$ hour, $m = 2.2$ を仮定した。また、機器故障率 λ 、頂上事象発生時の損失額 C_r 、点検に要する費用 C_c 、故障の修復する費用 C_r については、それぞれ下記のように設定した。

機器の故障率 $\lambda : 10^{-3}/y$

頂上事象発生時損失額 $C_r : 50$ 億円

点検に要する費用 $C_c : 10$ 万円

修復する費用 $C_r : 50$ 万円

各グラフの曲線は、下から順に $I_B(i)$ が、 2×10^{-5} 、 3×10^{-5} 、 4×10^{-5} 、 5×10^{-5} と仮定したケースのものである。例えば、 $I_B(i) = 5 \times 10^{-5}$ の場合、最適な点検・取替周期は 7.2 年で、そのときの期待費用はおよそ 12 万円と算出される。また、Birnbaum $I_B(i)$ が小さくなると、 T の最適値が大きくなると共に、 T がある程度を大きくすると、期待費用 $C_i(T)$ の変化が小さくなる傾向が見られる。

しかし、本手法を用いて実際に最適な点検周期を決定する場合には、機器の故障率の時間変化に伴う Birnbaum $I_B(i)$ の値の時間的変化を考慮する必要がある。安全サイドに考えるならば、各機器の取替周期が決まれば、その最大故障率が決まるため、この最大故障率を用いて Birnbaum $I_B(i)$ の値を再計算し、その値を用いて再度最適化を行うという計算を繰り返すことにより、整合性の取れた解が得られると考えられる。

3-2) 劣化の無い機器の点検/取替周期最適化

機器の劣化が小さいと考えられる待機系等の場合、故障率は一定と考えられる。このような場合、機器を定期的に取り替える意味はなく、点検により故障が発見された場合にのみ機器取替を行うこととなる。このことを踏まえ、次に故障率一定の場合の点検周期の最適化を考える。

故障率が一定の場合、機器を取替えても取替えなくても、その後の故障特性に違いはない。すなわち、点検周期毎に機器を取替える上のモデルで求めた機器故障に伴うリスクが、この場合にも用いることができる。ただし、機器の故障時間分布 $F(T)$ を指数分布 $1 - \exp(-\lambda T)$ とする必要がある。また、機器の取替は機器が故障している場合のみであるから、この場合、(4) 式は (9) 式のように若干修正されなければならない。

$$C_i(T) = \frac{C_{rI_B}(i) \int_0^T F(t) dt + C_c + C_r F(T)}{T} \quad (9)$$

故障時間分布に指数分布を用いると、(9) 式は次のようになる。

$$(C_{TB}(i) - \lambda C_r) (1 + \lambda T) \exp(-\lambda T) = C_{TB}(i) - \lambda C_r - \lambda C_c \quad (10)$$

上式を変形すると次式を得る。

$$(1 + \lambda T) \exp(-\lambda T) = 1 - \frac{\lambda C_c}{C_{TB}(i) - \lambda C_r} \quad (11)$$

左辺は、 $\lambda T > 0$ の領域では、 λT の増加とともに単調に減少する関数で、正の値を取り、その最大値は $\lambda T = 0$ のときで 1 である。従って、機器の故障に伴うリスク $C_{TB}(i)$ が無限の極限では、点検周期 T は 0 に近づくことが理解される。リスク $C_{TB}(i)$ が小さくなるに連れ、右辺の第 2 項が大きくなって点検周期が長くなり、右辺の第 2 項が 1 に近づくにつれ、点検周期は無窮大に近づく。右辺の第 2 項が 1 を越えると右辺は負となり、点検周期は無窮大となる。この条件は (12) 式で表され、この場合、機器は点検されない方が得策となる。言い換えると、機器の平均故障間隔期間におけるリスクが点検/取替の費用より小さければ、機器が壊れても修理せず放っておく方が良く、すなわち、無い方が良くということになる。

$$\frac{C_{TB}(i)}{\lambda} \leq (C_r + C_c) \quad (12)$$

仮に、機器の故障率等のパラメータが、ワイブル分布でのサンプル計算時のパラメータと同じとすると、Birnbau $I_B(i)$ が 1.2×10^{-7} を下回る場合には、壊れても放置しておく方が良くという結論になる。勿論、この議論は、経済性の観点からのみの議論である。

以上、ここで述べたモデルにより、最適な点検・取替周期の最適化が図れることが、理解される。

4. 結 論

本稿では、単独機器を対象とした保全政策についても、その前提条件（故障の検知可能性、機器の劣化の有無）によって様々な種類のものが考えられることを紹介し、文献(6)に述べられた定期取替政策に改良を加えることによって、より現実的な政策モデルを提案し、コスト評価を実施した。

1つの機器は複数の部位/部品から構成され、これらの部位/部品の劣化特性はそれぞれ異なっていると考えられる。したがって、今後の展開としては部位/部品

の劣化特性を考慮した機器の取替政策、点検/取替政策の最適化が考えられる。1つの機器の部位/部品を、系統あるいはサブシステムの機器と置き換えて考えれば、こうした最適化は、系統あるいはサブシステムの点検周期の最適化にもつながることが理解される。

いずれにせよ、定量的な評価を実施するためには機器劣化に関する有効なデータが必要である。しかし、現実には、劣化に関する十分なデータベースは未だ整備されてはいない。この点については、海外プラント、非原子力プラント等との横断的な協力関係が必要になる。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、有益なディスカッションとコメントを頂いた日本機械学会「軽水型原子力発電所保全研究分科会」のメンバーに深く感謝致します。

参考文献

1. (社)日本機械学会、RC158軽水型原子力発電所保全研究分科会 研究報告書、2000年3月。
2. 笠井雅夫 他、確率論を用いた保全の合理化、日本機械学会、67巻、659号、C編、(2001)、pp283-288。
3. 笠井雅夫、保全の定量化の試み、日本AEM学会、Vol. 8, No. 2(2000)、pp.35-42。
4. Handbook of Methods for Risk-Based Analyses of Technical Specifications, NUREG/CR-6141, (1994)。
5. 三根 久、河合 一著、信頼性・安全性の基礎数理、日科技連、(1984)、pp.151-159。
6. 「笠井 雅夫、浅野 廣海、"プラント機器の取替周期最適化」、フォーラム保全学誌、Vol.1, No.1(2002)、pp29-36

(平成15年10月14日)