



大規模複雑プラントシステムの保全水準と安全水準の定量化手法に関する研究

Study on a quantitative evaluation method of equipment maintenance level and plant safety level for giant complex plant system

東北大学 流体科学研究所 青木 孝行 Takayuki AOKI Member

In this study, a quantitative evaluation method on maintenance level which is determined by the two factors, maintenance plan and field work implementation ability by maintenance crew is discussed. And also a quantitative evaluation method on safety level for giant complex plant system is discussed. As a result of consideration, the following results were obtained.

- (1) It was considered that equipment condition after maintenance work was determined by the two factors, maintenance plan and field work implementation ability possessed by maintenance crew. The equipment condition determined by the two factors was named as “equipment maintenance level” and its quantitative evaluation method was clarified.
- (2) It was considered that CDF in a nuclear power plant, evaluated by using a failure rate counting the above maintenance level was quite different from CDF evaluated by using existing failure rates including a safety margin. Then, the former CDF was named as “plant safety level” of plant system and its quantitative evaluation method was clarified.
- (3) Enhancing equipment maintenance level means an improvement of maintenance quality. That results in the enhancement of plant safety level. Therefore, plant safety level should be always watched as a plant performance indicator

Keywords: Maintenance cycle, Equipment Maintenance Level, Plant Safety Level

1. 緒言

一般に保全活動は、プラント設備等の人工構造物が経年劣化あるいは機能異常を起こすことは必然との基本的認識に立ち、設備機器に対しその経年劣化状態を把握するために検査・モニタリングや補修等の保全行為を「計画」し、それを「実行」する。そして、その結果得られる設備機器の保全データ（点検結果など）を、設計データや運転データなども考慮してその時点および将来における機器の健全性を「評価」し、その評価結果に応じて運転継続するか、補修を実施するか等の必要な「是正措置」を計画、実行するとともに、それらの結果を次の保全計画に反映する。このように、保全活動は、計画(Plan)、実施(Do)、評価(Check)、是正措置(Act)の、いわゆる保全サイクル (PDCA) を構成している[1] (Fig. 1)。

本研究では、このような保全活動の中で、低下した機器の機能を回復させるために実施する保全行為が最終的にどの程度、機器やプラントシステムに造り込まれ、ど

のような保全状態あるいは機能できる状態となり、その状態が原子力発電所のような大規模複雑プラントシステムの機能にどのように影響するか、その後のプラント運転にどのような影響を与えらるかと考えられるか、に注目する。

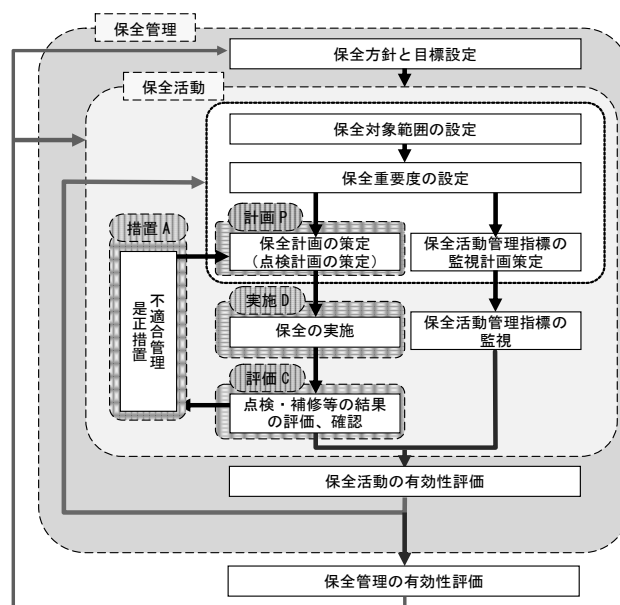


Fig. 1 Maintenance Cycle PDCA in Maintenance Activity Flow [2]

従来のように、保全行為の結果として得られる故障率を用いたプラントシステムの信頼性評価[3]では保全行為を完了した後の運転中における機器やその機器が属するプラントシステムの機能可能状態を予測評価したり、その後の安定運転を保証したりすることはできない。すなわち、過去の保全の結果である故障や故障率の実績だけでは機器の機能回復のために実施された保全行為によって当該機器あるいはその機器が属するプラントシステムがどの程度機能できる状態にあるか、安定したパフォーマンスを発揮できるか、明確にすることはできない。

そこで、本研究では、機能回復のために実施した保全行為の効果を定量的に評価できるようにするため、「保全水準」なる指標を定義し、保全行為を実施した時点以降の安全性に関する信頼水準すなわち「安全水準」を定量的に評価できる手法について検討する。

2. 保全水準と安全水準

原子力発電所のような大規模複雑プラントシステムは、膨大な数の機器から構成されており、保全行為はその1つ1つの機器に対して実行される。保全の結果、機器は全てが必ずしも良好な状態となるとは限らず、良好でない状態となるものも中には存在する。このように、保全行為によって多数の機器にそれぞれの状態で保全が造り込まれた結果、全体としてプラントシステムが或る一定の状態となり、その状態で機能することになる。このような保全行為後の状態を定量的に評価できれば、その後のプラントの安全安定運転を予測できるようになるだけでなく、プラントの安全性や信頼性を説明する上で説得力のあるものとなり、有用であると考えられる。

そこで、以下に大規模複雑プラントシステムである原子力発電所を例に取り、当該システムに造り込まれた保全状態を定量的に示すパラメータを「保全水準」として定義するとともに、その保全の結果として得られるプラントシステムの安全性を評価するパラメータとして「安全水準」を定義し、検討を進める。

2.1 原子力発電所の信頼性

一般に、プラントシステムを構成する多数の機器の特定の時点における故障率を仮定すると、その時点におけるプラントシステムの機能喪失頻度(FFF: Function Failure Frequency) は Fig. 2 のように表される。

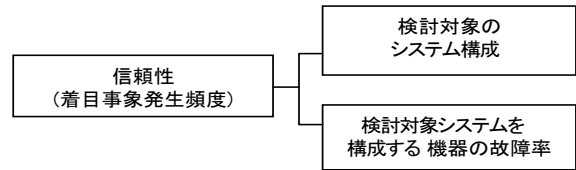


Fig.2 Definition of Function Failure Frequency

原子力発電所の場合、通常、その安全性を評価する指標として炉心損傷頻度(CDF: Core Damage Frequency) が用いられるが、この指標が用いられるようになったのは原子力発電所の安全性を考えたときに、着目すべき頂上事象は炉心損傷であり、その発生頻度 CDF が最も原子力発電所の安全性を特徴的に表せるためと考えられる。

一方、大規模複雑プラントシステムの保全最適化は、保全第2法則と第3法則から「安全性の最大化」と「経済性の最大化 (保全コストの最小化)」を同時に追求し、両者をバランスさせることである[4]ので、原子力発電所の保全を最適化するには、上記「安全性」リスクに加えて、もう一方の「経済性」リスクを考える必要がある。経済性リスクを評価するときに着目すべき事象は、プラントシステムの唯一の経済収入源である製品の生産を阻害する事象である。経済性リスクは、上記安全性リスクと同様、生産支障頻度 (PFF: Production Failure Frequency) として表すことができる (Fig. 3)。たとえば、原子力発電所の生産支障頻度とはプラントシステムを構成している機器が故障し、それが発電停止あるいは出力低下につながる事象の発生頻度のことである。ここではこれを発電支障頻度 (GFF: Generation Failure Frequency) と呼ぶこととする。

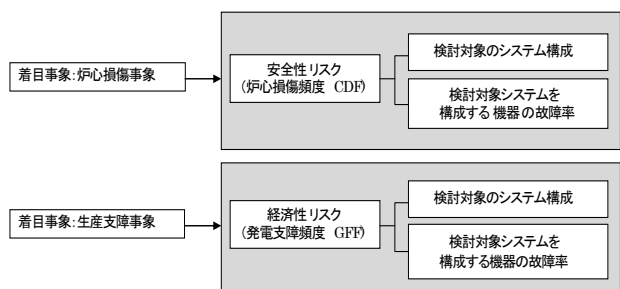


Fig. 3 Safety & Economic-related Performance Indicators in Nuclear Power Plants

CDF と GFF を決める要素の1つに機器の故障率がある。この故障率は過去の数多くの故障実績データを集計し、算出した値であるので、言わば、過去の保全の結果を表したもの、あるいは過去の保全の成績とも言うべきものである。通常、これら故障率はプラントシステムの信頼性を設計評価するために用いるので、それまでに得

られた数多くの故障実績データを包絡するように定められた保守的な値である。このため、設計評価上用いる故障率は、保全実行部隊が施工した保全によって造り込まれた機器の状態に応じて決まる当該機器の実際の故障率よりも大きく、その結果、設計評価上の当該システムの機能喪失頻度 FFF_{Design} は実際の機能喪失頻度 FFF_{Actual} よりも高くなると考えられる (Fig. 4)。したがって、設計評価上用いる故障率はその値の性格からして将来の信頼性を予測したり、将来の信頼性を保証したりするような性質のものではない。

そこで、Fig. 3 における機器故障率として将来の機器故障率の予測値を求めることができれば、将来におけるプラントシステムの信頼性を検討評価できる。このため、次項で保全水準なる概念を導入し、将来におけるプラントシステムの信頼性を評価する方法について検討する。

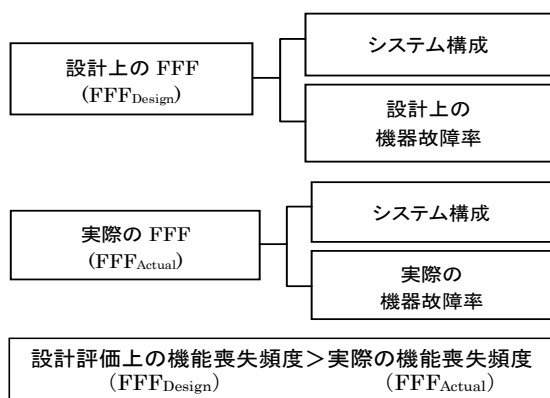


Fig. 4 Design & Actual Function Failure Frequency

2.2 保全水準と安全水準の定義

(1) 保全水準

前述の Fig. 2 の中でシステム構成はすべて設計で決まるのに対し、機器の故障率は保全が関与した結果として得られるものであり、実行された保全作業によって造り込まれた機器の状態によって決定されることが考えられる。言い換えると、保全作業が施された後の機器の状態を定量的に表すパラメータを保全水準とすると、保全水準は当該機器のどの部位にどのような劣化が発生するか予め知った上でその劣化を是正するために計画された保全計画に則って正確に保全作業を行うことによって確保されることが考えられる。したがって、当該機器にどのような保全を施すかを決めている「保全計画」の内容とその保全計画に従って保全作業を実行する部隊の「保全遂行能力」によって保全水準が決まると考えられる (Fig. 5)。

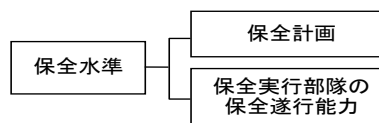


Fig. 5 Elements of Equipment Maintenance Level

以上より、保全水準は、保全作業完了後における機器の信頼性を担保する保全計画と保全実行部隊の保全遂行能力が決定する機器信頼性のレベルあるいは信頼水準と強い相関があるパラメータである。換言すると、保全水準は過去における保全の結果である機器の故障あるいは故障率ではなく、保全作業完了後の機器の故障あるいは故障率と相関のあるパラメータであるといえることができる。

保全水準が高ければ、保全作業の結果であるプラントシステムの信頼性は高くなる。したがって、過去の機器故障率のトレンドを踏まえ、現時点において実行した保全行為によって得られる保全後のシステムの信頼性は従来より高くなる、あるいは機器故障率は低くなると考えられる。逆に、その時点での保全水準が低ければ、保全後のプラントシステムの信頼性は従来より低下する。したがって、過去の機器故障率のトレンドを踏まえ、現時点において実行した保全行為によって得られる保全後のシステムの信頼性は従来より低くなる、あるいは機器故障率は高くなると考えられる。

保全水準は以上のような性質を持ったパラメータとして定義される。

(2) 安全水準

前項で述べたように、保全対象機器の保全計画と保全実行部隊の保全遂行能力によって保全が実行されると、当該機器は一定の信頼性が当該機器に造り込まれる、あるいは一定の保全水準に収まることになる。このような保全状態になった機器は一定のパフォーマンスを発揮し、結果として一定の故障率を生み出す。したがって、過去の故障実績データを用いてそれまでの機器故障率のトレンドを把握するとともに、保全行為を完了した時点における保全水準を評価し、保全水準とその後の機器故障率の変化傾向が関連付けられれば、その後のプラント運転中における故障率すなわち将来における故障率およびそれを用いて評価した運転中のプラント信頼性を予測することが可能になる (Fig. 6)。この具体的方法については第 3.1 節で述べる。

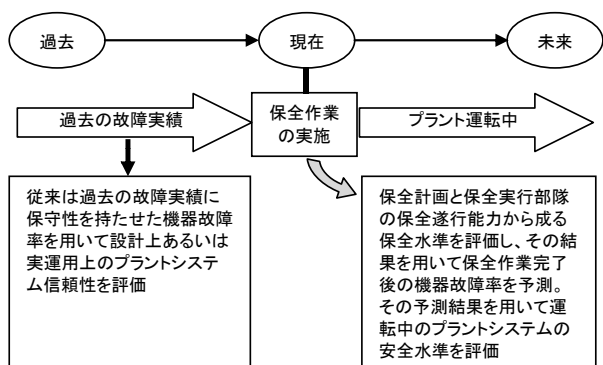


Fig. 6 Definition of Equipment Maintenance Level & Plant Safety Level

もしこのような故障率の予測値を導出できれば、その故障率を用いて機器の信頼性、延いてはプラントシステムの信頼性を予測できることになる。特に、着目事象として炉心損傷事象を選定すれば、原子力発電プラントシステムの CDF を予測できることになる。このようにして求めた CDF は、保全水準を加味した機器故障率の予測値を用いて評価されるので、過去の故障率に保守性を加味して設計評価上設定された機器の故障率を用いて評価された CDF とは本質的に異なるものである。

本研究では、保全水準を加味した故障率の予測値を用いて算出した CDF はプラントシステムの安全性のレベルを特定する内容を含んでいると考えられることから、これを「安全水準」と呼ぶこととする。

なお、ここでは詳述しないが、安全性の指標 CDF と同様、経済性の指標である GFF に上記概念を取り込めば、安全水準に対し、将来における「発電信頼水準」とでも

呼ぶべき内容を備えたパラメータを定義することが可能である。

3. 保全水準と安全水準の定量化手法とその活用方法

3.1 保全水準と安全水準の定量化方法

前述の議論を踏まえ、保全水準の概念を導入して保全行為を完了した時点以降のプラント運転時すなわち将来におけるプラントシステムの信頼性、安全性を定量的に予測評価する方法について以下に検討する。

(1) 保全水準の定量評価方法

前述のように、保全行為によって保全対象機器に造り込まれる保全水準は、保全計画の内容と保全遂行能力で決まる。保全計画は、保全対象機器、保全タスク、保全実施時期の三者から構成されており、また保全実行部隊の保全遂行能力は、保全員（作業員、検査員）、道工具類 / 特殊装置等、要領書の三者によって決定される (Fig. 7)。

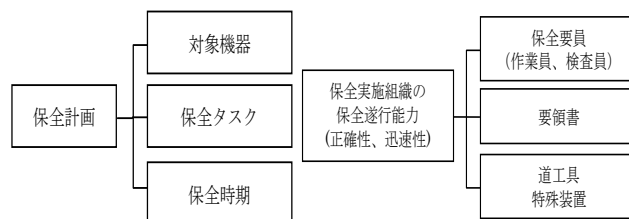


Fig. 7 Elements of Maintenance Plan & Maintenance Implementation Capability

Table 1 Evaluation of Maintenance Plan Appropriateness (Example)

評価項目	評価方法	評価基準	評定	総合評定
保全計画の適切性	対象機器選定	保全重要度の決定方法とその根拠の適切性を評定	優良可	優良可
	保全タスク選定	下記との比較で評定 ●標準保全テンプレート ●経年劣化まとめ表	優良可	
		下記との比較で実証性を評定 ●標準的工事方法 ●標準的検査方法		
保全時期決定	下記に基づく決定方法で、その適切性を評定 ●決定論的評価手法 ●確率論的評価手法 ●十分な経験に基づく方法	優良可		

Table 2 Evaluation of Maintenance Implementation Capability (Example)

評価項目	評価方法	評価基準	評価	総合評価
(保全遂行の正確性/迅速性) 保全遂行能力	保全要員	下記観点から評価 ●教育訓練、資格 ●習熟度	優良可	優良可
	要領書	下記との比較で評価 ●標準的要領書 ●産業界で用いられている方法	優良可	
	使用道工具類	下記との比較で評価 ●標準的道工具類 ●実証された特殊装置	優良可	

保全水準を評価するためには、これらの各要素を1つ1つ評価する必要がある。具体的な評価方法としては下表に示す方法が考えられる (Table 1、Table 2)。なお、我国の原子力発電所に対する安全規制には、原子炉等規制法第37条第5項などに基づく保安検査や電気事業法第55条第4項などに基づく定期安全管理審査があり、保全計画の適切性や保全の実行プロセスなどが定期的にチェックされるので、一定の審査基準の下に抽出された、保全に関する問題点や指摘事項の質、数量を定期的に知ることができる。したがって、これらの結果も勘案して保全計画の適切性や保全遂行能力を評価することが可能と考えられる。

このように、保全計画の適切性と保全実行部隊の保全遂行能力を評価し、それらを踏まえた総合評価として次のように保全水準を評価する (Table 3)。

保全水準の2要素すなわち保全計画と保全遂行能力は保全を実行しようとする組織が現在持っている保全能力であり、これは現在から将来に向かって行使される能力であるので、保全対象機器あるいはプラントシステムの将来における信頼性を決めるものである。また、保全水準が高いということは、保全計画と保全遂行能力に対する改善努力が常に為され、その時点における適切な保全が正確に施工されるということであるので、結果として機器故障率は従来レベルか、あるいは従来よりも改善されるはずである。逆に保全水準が低いということは、機器故障率が従来レベルか、あるいは従来よりも悪化するはずである。このように考えると、過去の運転保守実績から求められた機器の故障率のトレンドを踏まえ、将来における機器の故障率を下記のように予測することが可能になると考えられる (Fig. 8)。

Table 3 Evaluation of Equipment Maintenance Level

保全計画の適切性	優	保全水準中	保全水準高	保全水準高
	良	保全水準低	保全水準中	保全水準高
	可	保全水準低	保全水準低	保全水準中
		可	良	優
保全遂行能力				

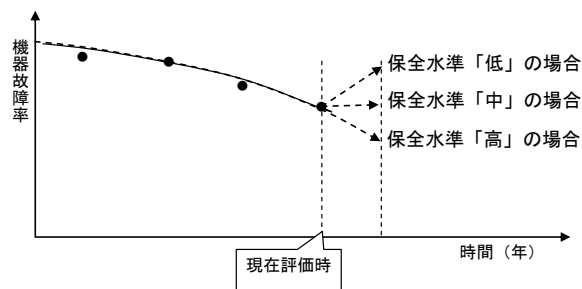


Fig. 8 History & Prediction of Equipment Function Failure Frequency

- a) 保全水準「高」の場合、従来実績を外挿して、より低い機器故障率を設定できる。
- b) 保全水準「中」の場合、機器故障率の従来実績と同等の機器故障率を設定する。
- c) 保全水準「低」の場合、従来実績よりも高めで、保守性を説明できる機器故障率を設定する。

(2) 安全水準の定量評価方法

このようにして決定した保全水準を使って求めた機器故障率の将来予測値を用いて CDF を評価する (Fig. 9)。

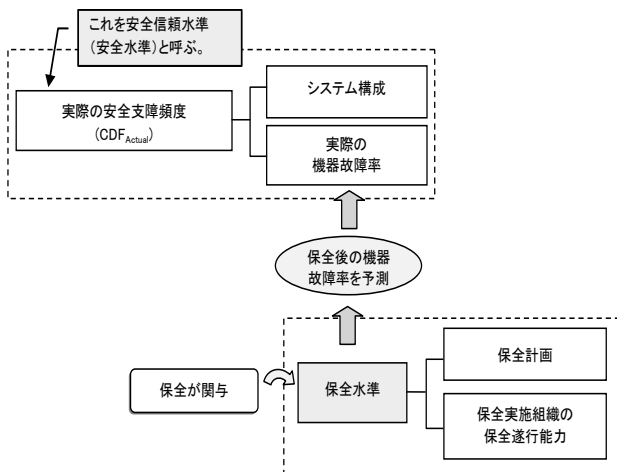


Fig. 9 Relation between Maintenance Level & Plant Safety Level

評価結果は、過去の故障率に保守性を加味して設計評価上定めた機器の故障率ではなく、保全水準を加味した機器故障率の予測値を用いるので、安全性リスクの指標である CDF は、保全行為を完了した時点以降のプラント運転中における「安全水準」と呼ぶことのできる内容を備えていると考えられる。

3.2 保全水準と安全水準の活用方法

前項で述べたように、保全行為によって保全対象機器に造り込まれる保全水準は、保全計画の内容と保全遂行能力すなわち現在持っている保全能力によって決定される。したがって、この保全水準を維持、向上させることは、保全行為によって造り込まれる保全品質を高め、その結果としてプラントシステムの安全水準や発電信頼水準を高めることに繋がるので、極めて重要である。しかしながら、保全能力は時間とともに低下する可能性があるため、長期間に亘ってこれを維持、向上させること、またそれを定期的にチェックし、必要に応じて是正することが重要である。このような改善活動を定着させるには、保全水準、安全水準さらには発電信頼水準を保全活動管理指標として保全活動の中に組み込み、常に監視すべきである。

一方、保全水準や安全水準は、その特徴あるいは性格からプラントシステムの安全性を説明する上で説得力のあるものに成り得ると考えられる。たとえば、原子力発電所のような社会的に関心の高い産業設備について、これら进行评估、確認し、社会に説明できるようにすることは、その安全性に対する説明責任を果たす上からも極めて重要である。

4. 結言

原子力発電所のような大規模複雑プラントシステムの信頼性を予測する定量的な評価手法を確立するため、保全水準および安全水準を定義し、その意味と活用方法について詳細に検討した。以下に本研究で得られた知見を要約して示す。

(1) 保全行為によって保全対象機器に造り込まれる保全状態は、当該機器にどのような保全を施すかを決定している「保全計画」の内容とその保全計画に従って保全作業を実行する部隊の「保全遂行能力」によって決まる。そこで、この2つの要素によって決まる保全状態を「保全水準」と呼ぶこととし、その評価方法を明確にした。

(2) 保全水準を加味した機器故障率の予測値を用いて評価された CDF は、過去の故障率に保守性を加味して設計評価上設定された機器の故障率を用いて評価された CDF とは本質的に異なる。この保全水準を加味した CDF を「安全水準」と呼ぶこととし、その評価方法を明確にした。

(3) 保全水準を維持、向上させることは、保全行為によって造り込まれる保全品質を高め、その結果としてプラントシステムの安全水準を高めることに繋がる。したがって、保全水準および安全水準を保全活動管理指標として保全活動の中に組み込み、常に監視すべきである。

参考文献

- [1] 青木 他、“保全活動の最適化と保全工学(1)”, 日本保全学会誌「保全学」、Vol.3, No.2 (2004)
- [2] (社)日本電気協会、“原子力発電所の保守管理規程 (JEAC4209-2007)”, 2007
- [3] 嶋田、宮崎、“確率論的評価手法を用いた簡便な原子力発電所の機器重要度分類方法の開発”, 日本原子力学会和文論文誌、Vol. 5, No. 3, pp. 167-178 (2006)
- [4] “原子力発電所の保全プログラムに基づく保全活動の検査手法に係わる調査・検討報告書”, 日本保全学会、pp. 199-201 (平成 20 年 2 月)

(平成 22 年 4 月 17 日)