

大規模複雑プラントシステムにおける保全活動の有効性 評価方法に関する研究

Study on how to evaluate the effectiveness of maintenance activities
for giant complex plant system

東北大学流体科学研究所 青木 孝行

Takayuki AOKI

Member

If we try to check the effectiveness of maintenance activities in nuclear power plant, it is necessary to evaluate plant performance from the viewpoint of nuclear safety and economy. So, in this paper, after the relation among maintenance optimization, maintenance performance targets, maintenance effectiveness indicator and maintenance key parameters important to nuclear safety and economy was made clear, a method to evaluate the effectiveness of maintenance activities was discussed. As a result of consideration, it was concluded that the maintenance effectiveness indicator proposed in this paper can evaluate maintenance effectiveness and can show the direction of improving existing maintenance program because the relation with maintenance performance target and maintenance key parameters is clear.

Keywords: Maintenance Cycle, Maintenance Optimization, Performance Indicator, Maintenance Performance Target, Maintenance Effectiveness, Maintenance Importance

1. 緒言

一般に保全活動は、次のような手順で実施される。すなわち、プラント設備等を構成する機器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、その劣化状態を把握するために検査・モニタリング等の保全行為を「計画」し、それを「実行」する。そして、その結果得られる機器の保全データ（検査結果など）を用いて、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.1-1)。

保全を最適化する場合、まず最適保全とは何を以って最適あるいは最良というかである。保全は一般に劣化という自然現象だけでなく、人間の判断が入る現象であるので、物理現象のように条件が与えられれば一義的に最適解が得られるようなものではない。したがって、漠然と最適、最良という、最良の人生とは何かを追求するのと同様、無限の問題、解けない問題となる^[2]。したがって、保全を最適化するには、保全を検討する時点において最適あるいは最良と考えられる保全目標を具体的に設定し、それを継続的に追求、実現しようとする問題、すなわち有限の問題に置き換えて解を求める必要がある (Fig.1-2)。ここで、保全目標は、保全法則が安全性の最大化と経済性の最大化を同時に要求しており^[4]、これが保全の目的であるので、安全性と経済性

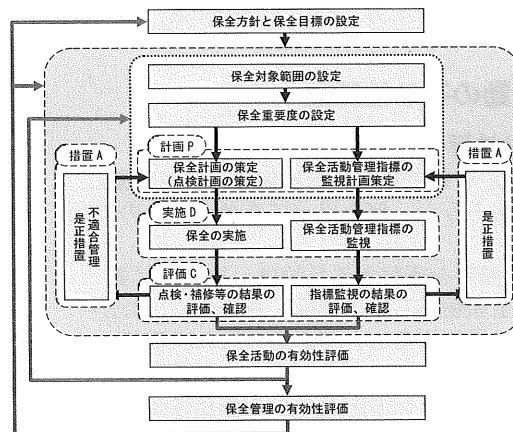


Fig.1-1 Flow of Maintenance Activities and Maintenance Cycle PDCA
(保守管理規程(JEAC4209-2007)^[2]を一部修正)

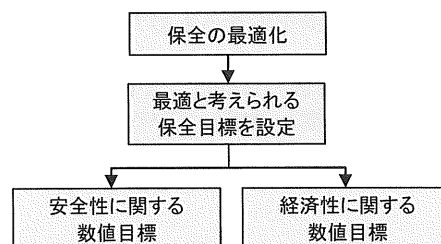


Fig.1-2 Relation between Preventive Maintenance Optimization & Maintenance Target

連絡先:青木孝行、〒980-8577仙台市青葉区片平2-1-1、東北大学流体科学研究所、電話: 022-217-5279、E-mail:aoki@wert.ifs.tohoku.ac.jp

の2つの目標を設定する必要がある。また、この目標は具体的な数値目標とし、これらを定量的に評価できるようにする必要がある。

一方、Fig.1-1に示すように、保全活動の中には上記の保全サイクルと並行して保全が有効に機能しているか監視するため、その監視活動を行うことが想定されている。この監視活動ではプラント設備等の安全性と経済性に対して保全活動監視指標（いわゆる Performance Indicator。以下 PI という。）を設定し、予め定められた保全目標に対してこれまでの保全が有効であったか評価される。これは、これまでの保全の結果である PI 値がどのような値を示し、保全目標との差を確認してこれまでの保全活動が有効であると評価できるか、有効でないとすればこれまでの保全の何をどう改善すればよいか、などについて検討、評価することを意図した活動である。しかしながら、前述の保全目標と予め設定すべき PI との関係、PI と保全活動に関する各種の保全キーパラメータとの関係など、必ずしも明確であるとは言えない。

そこで、本研究では、大規模複雑プラントシステムである原子力発電所を念頭に、これらの内容を明確にするとともに、保全活動の有効性を定量的に評価する方法とその考え方について検討する。

2. 保全活動の有効性評価

2.1 保全有効性評価の目的

「保全活動が有効である」とは何を以って有効と言えるのであろうか。何を以って有効とするのであろうか。

プラント設備等を運用する目的は、社会が必要とするもの（生産物あるいは製品）を安全に、しかもタイムリーに供給することである。これは取りも直さず、前述の保全法則の要求（安全性の最大化と経済性の最大化のバランスを追求）を満足させることである。そして、保全法則の要求を前述のように有限の問題に置き換えるために、具体的な保全目標を設定し、それを達成することである。したがって、保全有効性評価の内容はこれまでの保全活動が保全法則の要求を踏まえて設定された保全目標（安全目標と経済目標）を達成しているか否かを評価し、これまでの保全を是正する方向を示せるものでなければならない。

以上より、保全有効性評価の目的は、これまでの保全活動の結果が保全目標を達成しているか否かを評価し、その結果に基づき現状保全の何をどう改善すればよいか、その方向性を示すことであると言える。

2.2 保全有効性評価のための評価項目

原子力発電所の保全活動の場合、前述の保全法則が要求する安全性については、炉心損傷頻度

（CDF: Core Damage Frequency）を用いて評価することが定着している。特に、米国 NRC は原子炉監視プロセス（ROP: Reactor Oversight Process）^{[5][6]}のもとで原子力発電所の運転パフォーマンスを評価しており、これにはリスク情報に基づく考え方に従って7つの分野において監視指標を設定している。この中で保全に関するものは、原子炉事故に発展する恐れのある事象の発生頻度を低く抑える観点から下記があげられている^[7]。

- * 起因事象に関する監視指標（計画外スクラム回数、出力変動回数）
- * 緩和系に関する監視指標（安全系の非待機時間（UA 時間: Un availability Time）、安全系の保全で予防可能な機能故障回数（MPFF 回数: Number of Maintenance Preventable Function Failure））
- * バリア健全性に関する監視指標（燃料被覆管漏えい、一次冷却材系漏えい）

なお、米国 NRC は保全に関する監視指標の他、「放射線安全」および「安全保障」に関する監視指標を設定しているが、本研究では原子力発電所の保全活動に関する事項を対象としているので、これらについては検討対象外とした。

以上のように、米国 NRC は原子炉事故に発展する恐れのある事象である「起因事象（スクラムと出力変動）」「安全系の故障」および「RCS の漏えい」に着目している。これらは原子炉事故に発展する恐れのある事象として網羅的であり、また後述するように、これらの事象は保全活動のパフォーマンスの良否が如実に現れる保全キーパラメータと強く関連しており、さらに容易にカウントできる事象であるという PI に不可欠な特性も有している。したがって、これらは安全性に対する保全の有効性を評価、確認するためのものとして極めて妥当であると考えられる。

一方、前述の保全法則が要求する経済性については、投入した保全費用に対して得られる発電電力量の比である保全費発電単価が経済性に関する保全活動のパフォーマンスを評価するものとして最も相応しいと考えられる。

$$\text{保全費発電単価} = \frac{\text{保全費用}}{\text{発電電力量}}$$

この保全費発電単価を出発点に保全費発電単価に強く影響する因子を具体的に検討し展開した。

保全費は、保全の有効性を確認する観点から計画外の保全費に着目し、プラント停止、出力低下および出力影響なしの3つの場合を網羅的に想定するとともに、発電損失量に相当する発電損失費用も復旧費用の中にカウントするようにした。ここで、プラント停止は、常用系の MPFF によるプラント停止と待機系（安全系）の MPFF で許容待機除外時間（AOT: Allowed Outage Time）内に復旧できないこ

とによるプラント停止がある。出力低下は、常用系の MPFF による部分出力運転がある。出力影響なしは、上記以外のプラント出力に影響しない MPFF による故障の是正費用である。

発電電力量はプラント出力が変化する「プラント停止」と「出力低下」の2つの場合を想定し、前述の安全性指標と同様、復旧に要する時間と MPFF 回数をそれぞれ考慮する。

以上、安全性指標と経済性指標について検討した内容をまとめて Table 2-1 に示す。

2.3 保全有効性評価項目とその影響因子

これまでに述べた安全性および経済性に関する項目は、保全活動の有効性を確認するために必要であると考えられるが、これらに対し保全の観点からどのような保全キーパラメータが関与しているか、以下に検討する。

保全活動の有効性を確認するために必要な評価項目 PI は、機器に保全で予防可能な機能故障 (MPFF) が発生した時に顕在化するものをカウントして評価される。これらの評価項目を見ると、これ

Table 2-1 Study on Maintenance Performance Indicators developed from the Viewpoint of Maintenance Law

		保全活動の有効性を確認するために必要な評価項目 (PI)		左記評価項目の影響因子		
安全性指標 S (安全性リスク)	炉心損傷 リスク CDF	正常	正常待機時間	—		
		非正常	起因事象	計画外自動/手動スクラム回数	●MPFF が発生した機器 (保全重要度) ●MPFF 時の復旧に要する時間(保全実行部隊の作業遂行能力) ●MPFF が発生した機器の故障頻度(それまでに施した保全内容)	
				正常な熱除去機能の喪失を伴う計画外スクラム回数		
			計画外出力変動回数			
		バリア健全性	安全系の UA 時間	RCS 漏えい率が基準値を超えた回数 燃料被覆管漏えい (RCS 比放射能が基準値を超えた回数)		
安全系の MPFF 回数						
経済性指標 E (経済性リスク)	修繕費用	計画	計画通り使用した保全費用	計画保全費用消化率	—	
		計画外	MPFF 時の復旧に要した合計費用 (復旧費用=是正費用+発電損失費用) (発電損失費用=低下出力×DT/PP 時間×発電単価)	プラント停止	常用系機器の MPFF によるプラント停止時における復旧費用 待機系機器の MPFF によるプラント停止時における復旧費用	●MPFF が発生した機器 (保全重要度) ●MPFF 時の復旧に要する時間(保全実行部隊の作業遂行能力)
				出力低下	常用系機器の MPFF による出力低下時における復旧費用	
			出力影響無し	上記以外の是正費用	●MPFF が発生した機器の故障頻度(それまでに施した保全内容)	
	発電電力量	計画	生産電力量 (生産電力量=出力×OT 時間)	設備利用率(運転時間)	—	
		計画外	MPFF で発生した合計発電損失電力量 (発電損失量=低下出力×DT/PP 時間)	プラント停止	MPFF によるプラント停止時の復旧に要する時間(DT 時間) MPFF によるプラント停止に至る MPFF 回数	●MPFF が発生した機器 (保全重要度) ●MPFF 時の復旧に要する時間(保全実行部隊の作業遂行能力)
出力低下	MPFF による出力低下時の復旧に要する時間(PP 時間) 出力低下に至る MPFF 回数	●MPFF 時の出力低下量(経済重要度) ●MPFF が発生した機器の故障頻度(それまでに施した保全内容)				

UA: Unavailability
RCS: Reactor Coolant System
MRF: Maintenance Request Form

MPFF: Maintenance Preventable Function Failure
DT: Down Time
OT: Operating Time
PP: Partial Power

らはすべて保全活動のパフォーマンスの良否が如実に現れる項目があげられている。すなわち、これらの項目に強く影響する「保全に係わる因子」として下記があげられる。

- *MPFF が発生した機器（どのような保全を施した機器か、あるいは当該機器の保全重要度^[8]）
- *MPFF 時の復旧時間（保全要員確保、材料/道工具等の迅速調達、作業要領書準備などを含む保全実行部隊の迅速適切な作業遂行能力）
- *MPFF 時の復旧費用（保全要員の作業単価、迅速適切な作業遂行能力（作業時間）、材料/工具等の調達価格）
- *MPFF が発生した機器の故障率（過去の故障頻度とそれまでに施した保全内容）
- *MPFF 時の出力低下量（MPFF が発生した機器の経済重要度^[8]）

これらの影響因子は保全を論じる上で極めて重要な因子ばかりである。まず機器の保全重要度については、大規模複雑プラントシステムの安全性および経済性に当該機器がどのような影響を与えるかを示すパラメータであり、これが膨大な数の機器に対して定量的に評価できるようになれば、その影響度合いに応じてどの機器に重点的に保全資源を投入すればよいか明確になる。原子力発電所の場合、既に安全性に関する重要度の定量評価法については明確になっているが^[9]、経済性に関する重要度およびこれら2つの重要を総合した保全重要度については必ずしも十分な検討がなされていない^[8]。

次に MPFF 時の復旧時間であるが、これは原子力発電所の安全系については、運転上の制限（LCO: Limiting Conditional Operation）の逸脱時に迅速かつ適切に故障を修復できれば、UA 時間を短縮でき、安全性を高いレベルに維持できるので重要である。また、経済性の観点からも発電に供されている常用系の機器の故障を迅速かつ適切に修復できれば、経済性を向上させることが可能であるので重要である。この因子は保全を実行する組織、構成員の能力（品質マネジメントシステムや構成員の資格/教育訓練など）につながる極めて重要な因子である。復旧時間には、保全要員の迅速確保、材料/道工具等の迅速調達、保全実行部隊の作業遂行能力が関与している^[10]。

MPFF の復旧費用は、是正費用（作業員確保、材料/道工具等の調達、作業要領書の検討準備を含む工事費用）と発電損失費用（機器の故障により発電できなかつた電力量に相当する費用）を合計したものである。

MPFF が発生した機器の故障率は、それまでに当該機器に施した保全内容に依存すると考えられる。その保全内容とは、当該機器に適用する保全計画の内容（保全タスク、保全実施時期（検査周期等））と保全実行部隊の能力（作業員、材料/道工具類の調達能力等）から成るものと考えられる^[10]。

MPFF 時の出力低下量は、予め設定する当該機器の保全重要度を決定する中で考慮すべきものと考えられる。すなわち、当該機器が故障した場合、発電損失量がどの程度になるか考慮して保全重要度を決定する必要がある^[9]。

3. 保全活動の有効性評価方法

3.1 保全有効性評価の方法

(1) 保全有効性評価項目に対する目標値の設定方法
前述のように、保全有効性評価とは、プラント設備等の保全目標（安全性に関する目標および経済性に関する目標）に対し保全活動が有効に機能しているかを計測、評価することであると考えられる。したがって、保全有効性の評価に当たっては、計測可能なパラメータから成る指標とそれを評価する尺度（判断基準）が必要である。

Table 2-1 に示す「保全活動の有効性を確認するために必要な評価項目は、すべて計測可能なパラメータである。このうち、安全性指標については、目標とする CDF を達成できるように起因事象のスクラム回数や緩和系の MPFF 回数等の評価項目に対する目標値を設定することは可能であると考えられる。あるいは過去の実績に対して目標値を設定し、結果として CDF を低減する方法も考えられる。一方、経済性指標については次のように考えられる。すなわち、目標とする修繕費発電単価が決まれば、修繕費発電単価を構成する修繕費と発電電力量、さらにはその構成要素の1つ1つに対して目標値を配分することが可能であり、これらを判断基準とすることができる。

以上より、これらの評価項目を保全有効性評価項目、すなわち PI として用いることは可能と考えられる。

保全活動は、保全サイクルを実行することによって、保全目標の達成を目指して弛まなく現状保全を改善していこうとする活動である。したがって、この保全活動とその結果として現われる事象あるいは状況を監視し、必要情報をその都度調査することにより、前述の保全有効性評価項目を定期的に評価できる。この評価結果を踏まえて各評価項目の保全目標（判断基準）と比較し、そのギャップを確認すれば、注目すべき評価項目およびその影響因子が明確となり、それらをターゲットとして現状保全の内容を是正することが可能となる。このようにして現状保全の是正がなされれば、その結果は合理的に保全目標を達成することにつながるものと考えられる。

(2) 現状保全の是正方法検討

保全目標を達成するために現状保全をどのように効率的に改善するか以下に検討した。

①安全目標達成のための保全内容の改善

a) 計画外スクラム回数の低減

その MPFF により計画外スクラムに至る機

器を特定し、MPFF 回数の多いものに対し検査周期の変更や保全遂行能力の高い作業班を充てる等の保全内容を改善する。あるいは機器仕様の変更、冗長性追加などの設計変更を実施する。

b)UA 時間の短縮

UA 時間は、保全要員の即応体制や予備品/道具の確保、要領書の整備状況に依存する。したがって、保全重要度が高く、MPFF 時における UA 時間の長い機器に対してこれらを予め準備しておき、迅速に対応できるようにする。

c)MPFF 回数の低減

保全重要度が高く、MPFF 回数の多い機器に対し検査周期の変更や保全遂行能力の高い作業班を充てる等の保全内容を改善する。あるいは機器仕様の変更、冗長性追加などの設計変更を実施する。

d)RCS 漏えい回数の低減

MPFF による RCS 漏えいを防止するため、保全要員の教育訓練を充実させる。

②経済性に関する保全活動改善の方向性検討

a)計画外復旧費用の低減

経済重要度が高く、MPFF 回数が多い機器を特定し、

- 検査周期の変更や保全遂行能力の高い作業班を充てる等の保全内容を改善する。あるいは機器仕様の変更、冗長性追加などの設計変更を実施する。
- 発電損失を低減するため、保全要員の即応体制や予備品/道具の確保、要領書の整備を行う。
- 保全要員単価、材料/道具等の費用の低減に努める。

b)計画外発電損失の低減

その MPFF 時に発電損失量が多い機器のうち、MPFF 回数が多い機器を特定し、

- 検査周期の変更や保全遂行能力の高い作業班を充てる等の保全内容を改善する。あるいは機器仕様の変更、冗長性追加などの設計変更を実施する。
- 発電損失を低減するため、保全要員の即応体制や予備品/道具の確保、要領書の整備を行う。

3.2 保全有効性評価結果の活用方法

保全最適化を目指して現状の保全を改善するため、保全サイクルを実行しても、その改善がどの程度効果があったのか、保全目標に対して現状はどの位置にあるのか、など明確にならない。ただ闇雲に保全を改善する活動を繰り返すことになってしまう恐れがある。

これに対して、これまで述べてきた手法は有限の目標である保全目標を設定し、それに対して計測可能なパラメータから成る監視指標を設定、評価する方法である。この方法に従えば、現状保全の変更がどの程度効果があったか定量的に把握できるようになる。また、さらに是正すべきターゲットとその改善の方向性を明確にすることができるようになる。

要するに、定量的な保全有効性評価手法である監視指標 PI による方法は、現状保全を改善するための信頼できるインストラクターであると理解される。また、一方で現状保全の技術的妥当性や更なる改善の技術的妥当性を説明する上で説得力のあるものにな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、これらを評価、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

大規模複雑プラントシステムである原子力発電所で行われている保全活動の有効性を評価する手法を確立するため、保全最適化と保全目標の関係、保全目標と保全有効性を評価、確認するために必要な評価項目との関係を明確にした上で、保全活動の中で監視すべき指標とその評価方法について検討した。以下に本研究で得られた知見を要約して示す。

- (1) 保全有効性評価の目的は、これまでの保全活動の結果が保全目標(安全目標値と経済目標値)を達成しているか否かを評価し、その結果に基づき現状保全の何をどう改善すればよいか、その方向性を示すことである。
- (2) 保全有効性評価項目のうち、安全性に関する評価項目については、米国 NRC が採用している PI を用いるのが妥当である。一方、経済性に関する評価項目については、修繕費発電単価とその構成要素を用いるのが妥当と考える。これらの評価項目は、保全有効性評価のための PI と成り得ると考えられる。
- (3) 保全有効性評価項目は、保全重要度等の保全キーパラメータと強く関連しており、したがって、これらを活用すれば、現状保全の改善の方向を合理的に特定できる。

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] “原子力発電設備の「新検査制度」に関する論点評価(改訂2版)”, 日本保全学会「原子力

- 論点評価会議」、pp. 16-18 (平成20年11月)
- [4] 日本保全学会、“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る調査検討報告書”、pp.200-201 (平成20年2月)
- [5] NRC Inspection Manual Chapter 0305, “Operating Reactor Assessment Program”, January 29, 2004
- [6] NRC Inspection Manual Chapter 0608, “Performance Indicator Program”, April 2002
- [7] NEI 99-02, Rev.2, “Regulatory Assessment Performance Indicator Guidelines”, November 2001
- [8] 青木, “大規模複雑プラントシステムの保全重要度の定量評価手法に関する研究” 日本保全学会誌「保全学」投稿中.
- [9] 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)
- [10] 青木, “大規模複雑プラントシステムの保全重要度の定量評価手法に関する研究” 日本保全学会誌「保全学」投稿中.