

原子力安全と検査の関係に関する検討

Study of the relationship between nuclear safety and inspection

東北大学 流体科学研究所
東北大学 流体科学研究所

青木 孝行
高木 敏行

Takayuki AOKI
Toshiyuki TAKAGI

Member
Member

In this study, a relationship between nuclear safety and inspection/monitoring was discussed. As a result of consideration, the followings were made clear.

- (1) Nuclear safety is secured by the combination of safety functions of nuclear plant system and plant managements by the human system including plant operator's organization.
- (2) Nuclear plant systems should be managed for each safety system because safety functions are fulfilled for each safety system.
- (3) The integrity of concerned system in the future can be evaluated only by the combination of inspection/monitoring and ageing degradation evaluation.
- (4) Inspection and monitoring is positioned as one of activities in plant management by the human system.
- (5) The two step method to evaluate the system integrity by using the large and local area evaluation approach can be considered to be reliable and reasonable.

Keywords: Nuclear safety, Safety design, Plant management, Maintenance, Emergency response, Inspection, Monitoring, Accuracy, Reliability

1. 緒言

原子力発電所の安全性は、機械、電気、制御及び土木建築の各設備から成る機械系と、それを運用する人間系の2つの系に支えられていると考えられる (Fig.1)。機械系は多重性/多様性、独立性などのシステムに冗長性を持たせる安全設計上の配慮やフェイルセーフ、フルプルーフ、インターロック等のヒューマンエラー対策などがなされており、設計上の機能が発揮されれば、一定以上の信頼性あるいは安全性を確保できるようになっている。これに対し、人間系は、通常時 (平時) においては機械系を設計条件内で計画的に、しかも安全安定に運用 (運転、保全等) し、電気を生産するが、機械系の故障等の内部事象や地震・津波等の外部事象により、異常が生じたり事故状態になったりした時 (有事) は安全を確保するため、機械系を停止、収束させる等の、いわゆる事故対応を行う。言い換えると、原子力安全は機械系の安全機能と人間系の対応が相俟って確保されると言える。なお、ここで述べたプラントの通常時 (平時) における保全と事故時 (有事) における事故対応の間には Fig.2 に示す

ような対応関係があり、少なからぬ類似性があり、事故対応は有事の保全とも言えることが報告されている^[1]。



Fig.1 Conceptual structure of nuclear safety

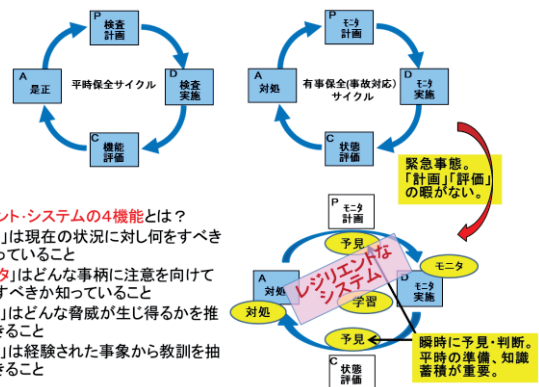


Fig.2 Similarity between maintenance in normal time and response in emergency

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

2. プラントの安全機能と検査の関係

2.1 系統単位の安全機能評価の必要性

原子力発電所は機械、電気、制御及び土木建築の4種類の機器から成り、その数は膨大である。これらの機器を管理する場合、個々の機器を個別に管理することは勿論可能であるが、通常、原子力発電所の各種の機能は系統単位で発揮されるように設計されているので、系統に属する機器全体を視野に入れて当該系統全体で信頼性が高くなるように管理することが重要である (Fig. 3)。

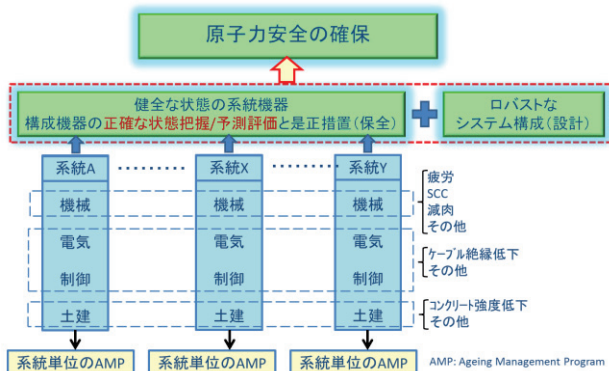


Fig.3 Relationship between nuclear safety and each plant system

2.2 プラントの安全機能を担保する保全活動

ある系統の安全機能は、当該系統に属する機器が健全な状態に維持されて初めて発揮されるので、個々の機器の状態を検査・モニタリングしその結果を評価した上で、必要な是正措置を講じる必要がある。その一方、系統の安全機能は地震や溢水、火災などの外的事象で損なわれる場合もあるので、両者を視野に入れた総合的な評価・管理が必要である。すなわち、系統単位の安全機能評価を行うに当たり、通常プラント運転状態を想定した劣化の評価・検討と不幸にして過酷事象に至ってしまった後の状態を想定した検討の2つの視点が必要であり、このような観点から検討した結果を平時及び有事の保全に反映することが重要である。

以上より、保全活動は「原子力安全」を確保するために行う活動の一部であり、機械系の「安全機能」を正常に、あるいは一定以上の信頼性をもって機能させるための活動であるということが出来る。検査・モニタリングはこの保全活動の一部として位置付けられる (Fig. 4)。

3. 原子力安全確保のための検査・モニタリング

の在り方

3.1 2段階スクリーニングによる経年劣化管理

機器の将来における健全性を評価・確認するには、検査・モニタリング技術と劣化評価技術を活用する必要がある。すなわち、機器の健全性は、検査・モニタリングを実施するだけでは判定できない。機器の状態を把握するために検査・モニタリングを実施した上で、その結果を劣化評価技術に入力してその後の状態を評価することによって初めて機能が維持されるか否か判定できる。このように、機器の健全性を評価・判定するには、検査・モニタリング技術と劣化評価技術の両方が必要であり、いずれを欠いても評価・判定できない¹²⁾。

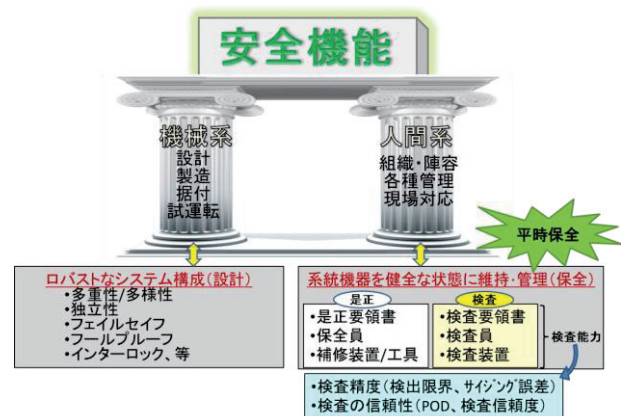


Fig.4 Design and maintenance securing the safety function of plant system

ここで問題となるのは、この両技術を使用して機器の健全性を確認する方法が安全性に係わることであり、その結果が信頼できる必要があることである。また、その一方で労力や時間を過度に要することなく容易であることが望まれる。すなわち、如何に両者を両立させることができるかが問題である。このような要求にこたえる方法として従来から下記に示す方法が考案されている。

- ・まず始めに、対象全体を概略調査し、劣化感受性の比較的高い個所を抽出する。
- ・次に、抽出された箇所を詳細調査し、当該部の現状及び将来を正確に把握する。

この考え方を本問題に適用すると、下記のようなになる (Fig. 5)。

- ・第1段階として、概略評価技術(あるいは広域評価技術)を用いて系統全体を概略評価し、詳細を把握すべき劣化感受性の比較的高い個所を抽出するとともに、概略検査・モニタリング技術(あるいは広域検査・モニタリング技術)を用いて系統全体を概略検査し、異常のないこ

とを実機で確認する。

- 第2段階として、詳細評価技術(あるいは局所評価技術)を用いて上記で抽出された詳細を把握すべき比較的感度の高い箇所を詳細評価し、現状及び将来を正確に予測するとともに、局所検査・モニタリング技術(あるいは広域検査・モニタリング技術)を用いて当該部を詳細検査し、異常のないことを実機で確認する。

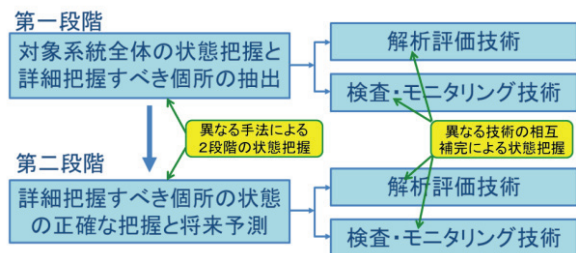


Fig.5 Two step method for the reliable and reasonable evaluation of component integrity

このような手法を取れば、実機で全ての箇所を網羅的に詳細検査する必要はない。信頼性が高く、効率的な方法とすることができる。ただし、これはあくまでも原則的な方法を示したものである。劣化事象や対象箇所によって合理的な範囲で一部を省略あるいは代替手法で代替することは可能である。

3.2 システム安全の観点から見た検査・モニタリングの在り方

前項で述べた経年劣化管理を念頭に、検査・モニタリングの在り方について検討する。

経年劣化管理は検査・モニタリング技術を用いて検査し現状の劣化状態を把握するとともに、その結果である劣化状態がその後の運転でどのように進展するか、劣化評価技術を用いて予測評価し、少なくとも次回検査までの健全性を証明することによって行われる。

検査・モニタリングを実施するには、事前にどの機器を「対象機器」とするか、どのような「検査方法」を適用するか、「検査時期」をいつとするかなどを決める必要がある。言い換えると、検査計画は検査対象、検査方法、検査時期の3つの要素を特定することで決定することができる。この検査計画を決定する具体的方法としてはTable 1に示す決定論的方法と確率論的方法が考えられる。

確率論的方法を用いる場合は、下記のような手順で検討することが考えられる (Fig.6)。

- ① プラント全体の確保すべき安全水準 (安全目標) を設

定し、その安全目標を満足するのに必要な安全機能を有する各システムの信頼度、そしてその各システムの信頼度を満足するのに必要な当該システムを構成する各機器の信頼度を明確にする。

- ② 上記の各システムあるいは各機器の必要信頼度を確保できるかどうかは、検査性能(あるいは検査の不確定性)と劣化評価の不確定性(予測誤差)を考慮した劣化の進展予測評価結果に依る。この検討評価によってシステムの信頼性を確保するために必要な検査性能が求められ、その必要検査性能に対して実際に適用する検査方法の性能が上回れば機器の信頼性、ひいてはシステムの信頼性が確保されることになる。ここでいう検査性能とは、検査の不確定性(サイジング精度、POD)のことである。

Table 1 How to determine the three elements of inspection plan

	決定論的方法	確率論的方法
①検査対象	検査対象グループ内の全数	検査対象グループ内からの抜取り箇所
②検査方法	下記性能を有する検査技術 ・サイジング精度(±e) ・信頼性(検出可能欠陥寸法)	同左
③検査時期	上記eとPODを加味した検査結果と劣化進展速度から決定論的評価方法を用いて次回検査時期を特定。 または、過去の経験を踏まえ、次回検査時期を特定。(一定の検査周期を特定。)	左記と同様の方法を用いて代表的部位の検査時期を特定。 特定の検査周期を仮定。
健全性確認方法	次回検査まで破損しないことを上記方法で確認。	同左 上記条件と劣化進展速度から破損確率を計算。目標値以下であることを確認。

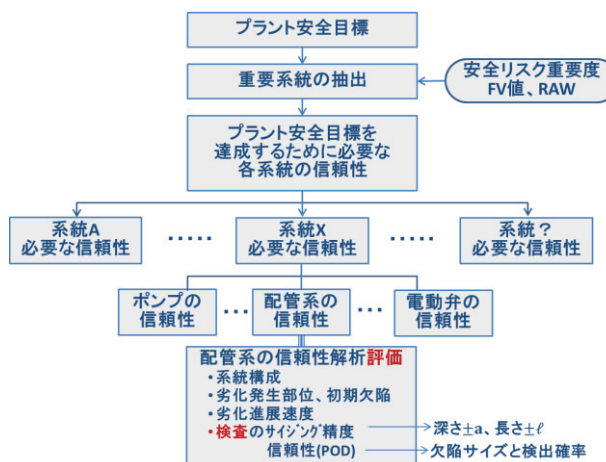


Fig.6 Required inspection ability securing a certain level of system reliability

原子力発電所を構成しているシステムは、前述のように、機械、電気、制御、土木建築の4種類の機器から成り、静的機器と動的機器から成っている。上記の検査不確定性と劣化評価不確定性はこれらの機器の全てに対し想定

される。したがって、原子力発電所の信頼性、安全性を議論する場合は、それらの不確定性を考慮した総合的な検討評価が必要であると言える。この検討評価を具体化するために検討用フォーマットを作成した。その一例として原子炉系について検討した例を Table 2 に示す。

Table 2 Inspection accuracy and reliability needed for ensuring a certain level of system reliability

例: 原子炉系

安全リスク重要度等により対象系統を特定

当該系統内にある機械、電気、制御、主送の各設備の機器をリスト

検査部位	材質 寸法 構造	ライジング精度		検査信頼性 (POD)		課題 調査・研究 項目
		健全性確保に必要な検査精度	現状技術の精度	健全性確保に必要な検査信頼性	現状技術の信頼性	
原子炉压力容器						
円筒胴(炉心領域)	低合金鋼 板厚??mm 円筒	DA: $a \geq T/4=40\text{mm}$ ($T=160\text{mm}$ と仮定) SA: $\leq \pm 7\text{mm}$	DA: ... SA: ...	$a \geq T/4=40\text{mm}$ を 100%検出
原子炉再循環出口ノズル	低合金鋼 板厚??mm ノズルコーナ					
CRDハウジング貫通部スタブ溶接部	Alloy600/Alloy82 板厚??mm J溶接					系統機器の機能維持の観点から、検査精度、検査信頼性を追求する必要がある箇所はどこか? その条件(材料、形状、寸法、応力)は?
原子炉再循環系						
配管(エルボ、ティ)	オーステナイト系 ステンレス鋼					安全重要度の高い機器 臨界欠陥サイズの小さい部位 進展速度が速い部位
ポンプ溶接部	同上					
弁溶接部	同上					

DA: Detectability Accuracy SA: Sizing Accuracy a: Crack Depth b: Crack Length

この表は原子炉系を構成する主要機器をすべて縦軸に列挙し、その1つ1つに対して健全性を確保するために必要な検査精度と検査信頼性(POD)に対し、実機に適用する検査技術の性能である検査精度と検査信頼性がどの程度かを横軸に記載して両者を対比できるようにしたものである。この表の欄を全て埋めれば、実機に適用する検査技術の技術的妥当性をチェックできるとともに、系統全体として必要な信頼性を確保できるか否か判定することができる。信頼性が確保できない場合は何が問題か、それを解決するためにはどのような課題あるいは調査・研究項目があるか、明確にするフォーマットとなっている。

4. 結言

本検討では原子力安全と検査モニタリングの関係について検討がなされ、下記が明確にされた。

- (1) 原子力安全は原子力プラントシステムの安全機能とそれを運用する組織の管理が相俟って確保される。
- (2) 原子力プラントシステムは、その安全機能が系統単位で発揮されるため系統単位で管理されるべきである。
- (3) 将来における系統の健全性は、検査・モニタリングと経年劣化評価を組合せて評価しなければ判断できない。
- (4) 検査・モニタリングは、人間系によるプラント管理の中の1つの活動として位置づけられる。
- (5) 広域評価と局所評価の二段階でシステムの健全性を評価する方法は信頼が高く、かつ合理的であると考えられる。

参考文献

- [1] 青木孝行、高木敏行、“保全科学の観点から見た原子力発電所の保全と事故対応の類似性に関する検討”、日本保全学会 第10回学術講演会 予稿集(2013年7月)、pp.349-354.
- [2] 青木孝行、高木敏行、“原子力発電所における検査計画の基本的立案方法に関する考察”、日本保全学会誌「保全学」、Vol.11, No.2 (2012)、pp.69-76

謝辞

本研究は原子力規制委員会 原子力規制庁からの受託事業である「高経年化技術評価高度化事業」の一環として日本保全学会「システム安全検査研究会」の場で議論した内容をまとめたものである。関係各位のご協力に謝意を表す。

