



原子力発電所の安全性を向上させるための 基本的な考え方に関する研究

Study of Fundamental Concepts for Enhancing the Safety of Nuclear Power Plants

東北大学 原子炉廃止措置基盤研究センター 青木 孝行 Takayuki AOKI Member

The world nuclear industry and regulatory authorities have experienced various serious accidents including TMI-2, Chernobyl and Fukushima Daiichi accidents so far. The industry organizations and the regulators work on reflecting the lessons learned from these accidents, and continuously study the lessons from actual operation and maintenance of their systems, equipment and processes. From this reflection and study they seek to establish a common, dedicated and effective “safety culture”. Very importantly, they establish and agree on key concepts, principles, requirements, and measures to ensure the safety and reliability of nuclear plants and activities; and protect individuals, the public-at-large and the environment. However, the individual positions and meanings of the key results throughout the entire group of organizations, the relationship among them, the needed structure and organization of nuclear safety implementation, mechanism of safety enhancement, etc. are not necessarily clear. In this paper, examples of this lack of clarity are reported and improvements are suggested.

Keywords: nuclear plant, nuclear safety, safety enhancement, safety structure, concept, principle, requirement, enhancement mechanism

1. 緒言

国際原子力機関（以下 IAEA という。）は、人および環境を電離放射線の影響から防護することを目的にハードウェアとソフトウェア/ヒューマンウェアの両面を視野に入れて基本安全原則^[1]を制定し、それに基づき事業者が安全対策を講じることを推奨している。また、原子炉施設を運営する上で重要な安全文化^[2, 3]についてもその意味やあり方を提言している。さらに、米国では原子力規制委員会（以下 NRC という。）がそのホームページの “How we regulate^[4]” の節で如何に規制を行っているかについて説明しているが、この中で特にリスク情報を活用して原子炉施設のパフォーマンスを監視し必要な措置を取る規制（Risk-informed and Performance-based Regulation^[5]）を軸とした原子炉監視プロセス^[6]（以下 ROP という。）を事業者の施設と活動に適用して安全の確保に貢献している。

一方、我が国では、1F 事故の教訓を踏まえ原子力発電所に対する規制の考え方が抜本的に変更され、上記の

連絡先: 青木孝行、〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01-2、東北大学 原子炉廃止措置基盤研究センター、E-mail: takayuki.aoki@qse.tohoku.ac.jp

IAEA や NRC の考え方を参考に新しい規制の枠組みや規制基準等が原子力規制委員会（以下、NRA という。）によって構築された。この変更で最も重要な変更点は、Fig.1 に示す点であったと思われる^[7]。また、1F 事故後に制定された新規規制基準である原子力委員会規則第五号^[8]および第六号^[9]は最低線の規制要求であり、それ以上の安全性を事業者が常に追求し続けることを前提とした安全性向上評価制度^{[10], [11]}が構築されたことも特筆すべき点であると思われる。

以上のよう
に、世界
の原子力界
はこれまで
の幾度にも
わたる事故
等からの教

訓を得、英知と経験を結集して知識基盤や安全確保方策などを構築し実践してきている。しかしながら、これらの基本的な考え方や原理・原則、方策などのそれぞれは安全確保上重要であることは明白であるものの、それらの

• 原子力事業者等に対し安全を確保するための要求事項を示し、その遵守を義務付ける。
• 規制機関は複数の形態の検査により、基準等への適合性の確認、原子力事業者等の保安活動の実施状況の監視を行う。

↓ 変更

• 事業者の安全確保に関する一義的責任が果たされ、自らの主体性により継続的に安全性の向上が図られる。
• 事業者及び規制機関の双方の努力により、より高い安全水準が実現される。

Fig.1 Change of the Basic Principle of Nuclear Regulation in Japan

コアとなっている考え方は何か、どう理解したら良いのか、安全性を維持・向上させるメカニズムはどのようになっているか、それをどう活かそうとして規定されたものなのか等、必ずしも明確であるとは言えない。それらの要求をただ闇雲に実践するのではなく、その意味や心が理解できれば、安全活動を担う個々人が自分の仕事の重要性を認識し納得して実施できるようになる。また、数多くの関係者の意志や意識を統一して力を結集しやすくなり、その結果として安全性を格段に高められるものと期待される。

そのため、本論文では、上記の明瞭でない点の例を示すとともに、原子力安全を向上させるための基本的考え方や原理・原則が意味するところは何か、安全性を向上させるメカニズムはどのようになっているか等について分析・検討し、その結果を踏まえて迅速・着実に安全性を向上させるにはどのようにしたらよいか、以下に検討する。

2. 原子力安全の構造

2.1 原子力発電所の安全と保安活動

世界の原子力界はこれまで試行錯誤を繰り返しながら英知を結集して原子力発電所の安全性を確保し、それを向上させてきた。当初は深層防護対策や系統・機器の多重性/多様性・独立性（位置的分散を含む。）の確保、安全裕度の確保、応力腐食割れ（SCC）を始めとする経年劣化対策等を行うことによってハードウェアを主体とした信頼性向上を図ってきた。その後、米国ではTMI事故を経験して原子力発電所を運営する組織・構成員による保安活動（ソフトウェア、ヒューマンウェア）が安全性に大きな影響を与えるとの認識が高まり、各種の対策が施されるようになった。この事故をきっかけとしてNRCが行った規制強化は産業界から効率的・効果的でないと強い批判を受けることになり、前述のROP制度が生まれることとなった。このROPによる規制は、規制リソースが有限であることを認識し安全上重要な原子炉施設（ハードウェア）と事業者による保安活動（ヒューマンウェア/ソフトウェア）にリソースを重点投入して安全性の確認と必要に応じた措置を取るという戦略と方針に基づくものであり、それまでの規制にはない画期的な方策であった。また、チェルノブイリ事故を経験し、従来の設計ベースの安全対策に加えて過酷事象を想定したハードウェア対策（シビアアクシデント対策、アクシデントマネジメント対策）が行われるとともに、前述のIAEA安全文化の概念が生まれた。さらに、東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所事故（以下1F事故とい

う。）を契機にIAEAでは、原子力事故を人・技術・組織（ITO：Individual, Technology, Organization）の観点（Table 1）から捉えてどのようにして不測事態に対する備えを強化するかについて原子炉施設というハードウェアだけでなく、人と組織・体制（HOF：Human and Organizational Factors）を含めた全体システムで安全をどう構築するかを検討し、そのための対策を提言した^[12]、^[13]。このように、ハードウェアもソフトウェア/ヒューマンウェアもこれまでの苦い事故経験を踏まえて当初より格段に高度化してきており、NRCやNRAの規制基準等に数多く取り込まれている^[14]、^[15]。

Table 1 Examples of Human, Technology and Organization

人的因子 (Human Factors)	技術因子 (Technical Factors)	組織因子 (Organizational Factors)
人間の能力 人間の制約条件 知覚された職場環境 やる気、意欲 個々人の理解 感情 その他	設計 既存技術 ハードウェア/ソフトウェア 確率論的リスク評価(PRA) 決定論的リスク評価(DRA) 技術仕様 計装制御 (I/C) 材料の品質 装置 その他	ビジョンと目標 戦略 ビジネスモデル 統合管理システム 継続的改善 決断プロセス 知識管理 優先順位 コミュニケーション 実施体制（協会会社を含む） 職場環境 安全文化 その他
(注)本表は参考文献[13]を参考に著者が作成した。		

2.2 原子力安全を支える機械系と人間系

前項の議論を踏まえて原子力発電所の安全性に大きく影響を与えるファクターを考えると、下記のキーワードをあげることができる。

- ・原子力発電所の安全思想、安全設計（Hardware）
- ・保安活動を行う事業者組織・構成員（Humanware）
- ・戦略・方針、考え方など（Software）
- ・事業者による保安活動
- ・保安活動に使用される技術（Technology）

これらのキーワードは原子力安全の構造がどのようになっているかを検討する上で極めて重要であると考えられる。以下にその原子力安全の構造について考察する。

原子力発電所は膨大な数の機械、電気、制御、土木建築の各種機器・構造物から成っており、それらが複雑に関連しあって安全機能をはじめとする多くの機能や性能を発揮し、その結果として発電がなされている。このハードウェア・システム（ここではこれを総称して「機械系」という。）は深層防護や系統・機器の多重性/多様性/独立性の他、フェイルセーフやフールプルーフ、インターロックなどの各種の安全設計が施されており、機械系として一定の信頼性を確保し、その結果として安全性を確保できるようになっている。しかしながら、それだけでは十分でなく、機械系が予め付与された機能/性能を発揮させるために必要な活動を行うヒューマンウェア・システ

ム（ここではこれを総称して「人間系」という。）があり、それが機械系の運転や保全をはじめとする保安活動を適切に行うことによってはじめて安全が確保される。この時、機械系の設計特性や経年劣化等をよく理解するとともに、人間系の特性やパフォーマンス（実務遂行能力）もよく理解した上でそれら両方を考慮して保安活動の計画（Plan）、実施（Do）、評価（Check）、是正（Act）を継続的に実施する必要がある。この保安活動PDCAが適切でないと、機械系の機能性能を維持・向上されることはできない。なお、この保安活動PDCAに際しては、各種の技術（Technology）やソフトウェア（Software）、すなわち特殊装置や特殊道具類などを用いる技術からインフラユーティリティまで、あるいは解析評価に用いるソフトウェアまで多種多様なものがある。

このように、原子力安全は、原子力発電所の機械系だけでなく、人間系も含めた2つの系で支えられており、これら2つの系の間で展開される保安活動PDCAが適切に実施されてはじめて確保される。したがって、これまでの機械系主体の安全性向上対策に加えて、人間系の活動によって得られる安全目標を現状よりも高く設定して保安活動の質を向上させれば原子力安全は向上させることができる。

以上を図示すると、Fig.2に示すように表現できる。

ここで、人間系とは、原子力安全の確保、維持・向上を目指す最前線の人々の他、彼らの所属する組織あるいは会社を含めて考える必要がある。

また、その組織あるいは会社は社会や世界からの影響を大きく受けることがあるので、それらも含めた広がりを持ったものとして考える必要がある。また、人間系は各種の技術（Technology）を駆使して活動に当たるので、前述のIAEAのITOのように考える必要がある。これについても忘れることができない重要なポイントである。

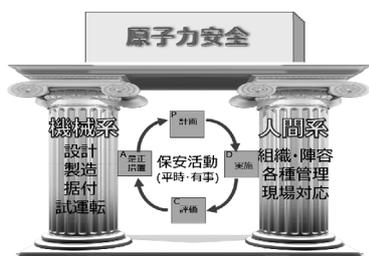


Fig.2 Structure of Nuclear Safety

3. 安全性を維持向上させるメカニズムと具体的方法

3.1 安全性を向上させる方法

安全性を向上させる方法には、機械系を改善することによって安全性を向上させる方法（機械系の安全性向上策）と人間系に関わる部分の改善によって安全性を向上

させる方法（人間系の安全性向上策）の2つがある。

(1) 機械系の安全性を向上させる方策

機械系（ハードウェア）の信頼性を向上させ、それを安全性の向上につなげる方法としては下記が考えられる。

- 安全機能を有するシステムを構成する数多くの機器、特に安全重要度の高い機器の信頼性を向上させる。
- 安全機能を有するシステムについて、内的事象および外的事象を想定し、それらに対して信頼性が高く、かつロバスト性の高いシステム構成を特定するため、感度が比較的高いと考えられる条件をパラメータとした各種のケーススタディを行い、その中から最適なものを出し出す。

このように、機械系の安全性を向上させる方法は数学的手法などの客観的な方法を用いて検討できる場合が多く、考え方が整理されているので、機械系の改善による安全性の向上については、これ以上の検討は行わない。

(2) 人間系のパフォーマンス向上によって安全性を向上させる方策

たとえば、機器の健全性を非破壊検査する場合、検査要領書、検査員、検査装置の三者の組合せで検査のパフォーマンス（検査精度、検査時間など）が決まることはよく知られている。これを一般化すると、組織の構成員のパフォーマンスは、それが現場での保安活動であれば、効率・効果的な手順・方法、構成員の能力、用いるツール等の三者の組み合わせで決まると考えられる。それが技術検討であれば、やはり効率的・効果的な方法、構成員の能力、用いる技術やソフトウェア等の三者の組合せで決まると考えられる。ここで構成員の能力とは、体調も大きな影響を及ぼすので、それを含めた能力を考える（Fig.3）。

人間系による保安活動のパフォーマンスを向上させ、その結果として安全性を向上させるには、これら三者のそれぞれを下記のように改善することが考えられる。

- ① 組織体制・陣容や社内規程・ルール、仕事のやり方等を変更し、適切な品質マネジメントシステム（QMS）を確立してパフォーマンスを向上させる。
- ② トレーニングや経験の積上げによって構成員の能力を向上させるのはもちろんのこと、人間が生来持っている負の特性¹も考慮し、それらが表面化しないよう

¹ プログラム通りに決められたことをいつでも正確に繰り返し実行できる機械と異なり、人間は集中力や緊張を長時間維持して正確に作業を実施することが苦手であったり、時間の経過とともに目標目的を見失いがちであったりする。また、数多くの人が集まって1つの目標目的のために意志統一して活動することが苦手である。環境が悪いとパフォーマンスが極端に低下する面もある。

な仕組みややり方を採用してパフォーマンスを向上させる。

- ③ 特殊装置や道工具類、ユーティリティなどを用いる技術から解析評価に用いるソフトウェア/インフラまで効率的・効果的な手段を用いてパフォーマンスを向上させる。

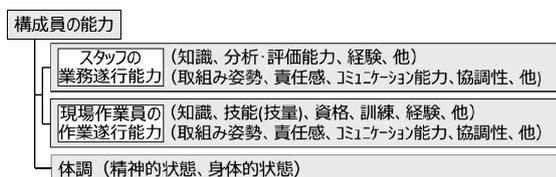


Fig.3 Capabilities of Staff and Employees

3.2 安全性を向上させる効率的・効果的な方法

前述のように、人間は生来怠惰な面のある特性を持っており、時間の経過とともに仕事のパフォーマンスが低下したり、ときには失敗を犯したりする。このような負の特性を完全に無くすことは不可能であるので、次善の策としてそれを顕在化させない方法あるいは最小限化する方法を考える必要がある。それには具体的にどのような方法があるのか。以下にこれについて検討する。

効率的・効果的に安全性を向上させ、高度なレベルへ引き上げようとする場合、基本的に下記の4つの効率的・効果的な方策を取り入れることが合理的であり、重要なポイントであると考えられる。

(1) 重要事項の絞込みとそこへのリソースの重点投入

組織が持っているリソース（ヒト、モノ、カネ、時間、情報など）は有限であることを認識し、安全性に大きな影響を与えるポテンシャルを持つ対象あるいは保安活動を予め特定してそれらにリソースを重点投入することにより、用意周到な計画を立案し、それに基づき慎重に実施する。また、そのようにして実施した保安活動の結果、発生した問題や失敗あるいは発生する可能性のあった問題や失敗などのうち、影響度の大きいものに対してリソースを重点投入し、根本原因調査や対策、水平展開などをしっかり実施する。逆に大きな影響のない対象あるいは保安活動、影響度の小さい問題や失敗などについては、必要な最小限の対応に留める。

(2) 具体的目標の設定

保安活動の具体的目標を設定してその達成に向かって常に努力することを促す仕組みを導入する。その具体的目標との関係が明確で、しかも定量的にカウントできるパフォーマンス指標を設定して常に目標と実績のギャップを監視し必要な是正を行う仕組みを導入する。

(3) 組織運営の仕方と役割分担

組織のトップマネジメントが安全に関する方針と目標の方向性を示し、その目標の方向性を具体的な目標に変換しそれを達成する上での課題や問題にチャレンジして迅速・着実に目標を達成できるように組織を牽引するリーダーシップと目標達成を目指す日常活動の実務PDCAを計画通り円滑・確実に回すために組織を動かすマネジメントを重視した組織運営を行い、目的達成のための推進力を最大限に発揮できるようにするとともに、無駄を極力排除する。

(4) 良好な職場環境の整備・確保

人間系による保安活動のパフォーマンスを向上させるために、それを構成する前述の「効率・効果的な手順・方法」「構成員の能力」「用いるツール等」の三者のそれぞれを改善することを議論の前提とする。その上で現有的人間系全体のパフォーマンスを向上させるために、個々の構成員の能力を発揮できる環境を整備することが極めて重要なポイントである。なぜなら構成員の能力は与えられた環境によって大きく変わるからである。

上記(1)~(4)に関連して重要と考えられる事項について以下に考察する。

4. 考察

4.1 重要系統・機器の絞込みとリソースを重点投入することの意味

前述の「3.2 (1) 重要事項の絞込みとそこへのリソースの重点投入」は、たとえば、保全活動を例にとつて考えると、保全対象機器を可能な限り絞込み、その機器に対して実施しなければならない保全をパフォーマンスに応じて保全リソースを傾斜配分するとともに、無駄のない合理的な保全を実施することにより、必要最小限の労力で目標を達成しようとする考え方である (Fig.4)。

ここで注意を要するのは、第1段階で重要機器を絞り込んだ後、系統・機器のパフォーマンスに応じて保全リ

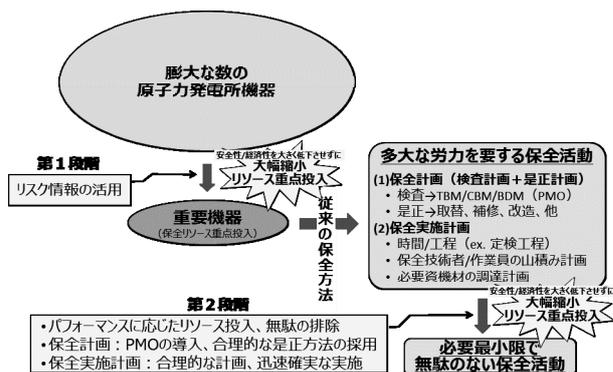


Fig.4 Minimization of Necessary Work and Focused Resource Allocation

ースを傾斜配分して保全作業を実施する第2段階である。検査計画 (P) や補修等の是正計画 (C) を立案する際には保全テンプレート等を活用する予防保全最適化 (PMO) 手法を適用するなどして合理的に計画されてもその実施段階の計画、すなわち検査実施計画 (D) と是正実施計画 (A) において工事工程や保全作業員の配置計画、使用資機材の調達計画、各種管理の計画等に無駄が多いと、これらには大きな費用が伴うため、結果として大きな費用の無駄につながることになる (Table 2)。したがって、たとえば、機器が故障したとき、当該機器の重要度が高い場合は必要十分な対応を取る必要があるが、重要度が低い場合は、是正計画を当該機器の復旧のみとし、故障原因の調査や水平展開などを実施せずに済ます等のメリハリをつけた対応が必要である (Table 3)。重要度すなわち影響度が小さく、したがって価値の少ない対象

Table 2 Efficient and Effective Way at Each Step of Maintenance Cycle PDCA

実施項目	効率的・効果的な方法
P 検査計画の適正化 ・対象機器 ・検査方法(検査タスク) ・検査時期	予防保全適正化(PMO)手法を適用し、対象機器の重要度等に応じた適切な検査方法と検査時期を選定し、不必要な検査をやめる。
D 検査実施計画の適正化 ・検査作業要領書作成(各種管理計画 ^{注1)} を含む) ・検査要員計画 ・調達計画(使用資機材)	対象機器の重要度に応じた適切な保全遂行能力 ^{注2)} を割当て、不必要な努力や時間を掛けない。
C 是正計画の適正化 ・対象機器 ・是正方法(是正タスク) ・是正時期	対象機器の重要度等に応じた適切な是正方法(補修等)と是正時期を選定し、不必要な是正をやめ、既定工法を含む適切な是正を実施する。 また、重要度に応じた水平展開を行い、重要度の低い機器に対しては、水平展開を実施しない等の適切な措置を取ることが重要。
A 是正実施計画の適正化 ・是正作業要領書作成(各種管理計画 ^{注1)} を含む) ・是正要員計画 ・調達計画(使用資機材)	対象機器の重要度等に応じた適切な保全遂行能力 ^{注2)} を割当て、不必要な努力や時間を掛けない。

注1) 保全遂行能力は作業要領書、作業実施項、使用資機材の3要素から成る。
注2) 各種管理とは、QVQC、労働安全、品質、異物等の管理を指す。

Table 3 Relationship between Component Failure and its Importance of Safety (Example)

	故障原因の明確度		備考
	原因が明確/過去に経験有り	原因が不明確/過去に経験無し	
故障時影響度 (安全重要度)	高	詳細原因調査実施(確認) 対策実施* 水平展開実施*	RCA実施 対策実施* 水平展開実施*
	中	詳細原因調査不要 (状況記録) 是正(取替or補修)実施* 水平展開任意	詳細原因調査実施 対策実施* 水平展開実施*
	低	詳細原因調査不要 是正(取替or補修)実施* 水平展開任意	詳細原因調査任意 是正(取替or補修)実施* 水平展開任意

RCA: Root Cause Analysis (根本原因分析)

には徹底してリソースの投入を抑制し無駄を省かないと、重要な部分に必要なリソースを投入できず、却って安全性を低下させる危険性があるからである。

前述のように、原子力発電所の保安活動に投入できるリソース (ヒト、モノ、カネ、時間、情報など) は有限である。そのような制約の中で安全性を一定以上のレベル以上に確保しそれを維持・向上させなければならないのである。その場合、重要な系統・機器を特定しそれにリソースを重点投入する、逆に重要でない系統・機器には可能な限りリソースを節約することが必要となる。ここで

重要なことは、重要でない機器に必要な以上のリソースを投入すればプラント全体の安全性を低下させてしまう可能性があると考えなければならないということである。なぜなら重要でない系統・機器にリソースを投入すれば、結果としてその分、重要な系統・機器へリソースを配分できず、手薄になるからである。

Fig.5 は、原子力発電所の系統・機器を1つの平面で表わし、これを空間軸に、そして各種の系統・機器に対する保安活動 (運転、保全を含むすべての保安活動) が実行される流れを上下方向に取り、これを時間軸にして表したものである。上下2つの平面のうち、上の平面はある時点での系統・機器を、下の平面は一定の時間が経過した後の系統・機器を表している。各平面を構成している小区画はその1つひとつが系統を意味し、各区画の中の平面はその系統を構成している多数の機器を意味している。

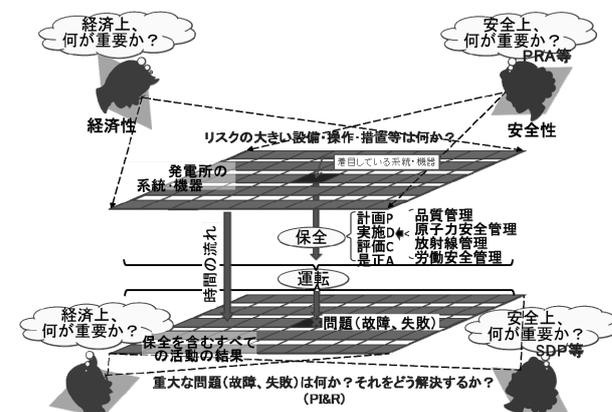


Fig.5 How to Identify Importance from the Viewpoint of Nuclear Safety and Economic Efficiency

同図において上の平面は、たとえば、保安活動の計画段階における系統・機器であるとする、計画段階では原子力発電所全体を俯瞰し、どの系統・機器や操作等が安全上重要か、どの系統・機器や操作等が経済上重要かを評価し認識した上で系統・機器の重要度に応じてリソースを傾斜配分した保安活動計画を立案することが極めて重要であることを示している。通常、原子力発電所の保安活動は膨大なリソースを必要としており、重要度の高い系統・機器や操作等を知りそれらにリソースを重点投入する等の効率的・効果的な方法を適用しないと、有限なリソースの下では安全性が損なわれる可能性があるからである。一方で重要度の低いものに対してはどこまでリソースを節約できるかを見極め、節約できたリソースを重要度の高いものへ振り向けることが重要である。また、経済性の観点から計画外停止を低減し稼働率を向上させるため、同様の考え方でリソースを投入し、無駄を極力排除してリソースを確保することも重要である。

一方、時間軸に沿って保安活動が進み、その途中で検討内容にミスや問題が生じたり、現場操作や運転中機器に失敗や故障等の問題が発生したりする場合があるが、このような保安活動の結果として何らかの問題が発見された、ある時点における系統・機器を下の平面で表している。各種の系統・機器で生じる事象は一時期に集中して発生するものではなく、いろいろな時点で生じ得るが、ここでは象徴的に問題が発見された時点における系統・機器として下の平面で表現した。ある時点で問題が生じるということは、問題が発生するまでの保安活動に何らかの問題があったため発生したものであるが、これらについてもリソースを無駄使いしないように効率的・効果的に対応することが重要である。そのためには、発生した個々の問題に対してその重要度を評価しその重要度に応じてリソースを傾斜配分し事後対応や将来計画への反映に当たることが重要である。もちろん、問題が生じる前に予め重要度の高い問題を把握し、それらが発生する可能性のある活動や作業に重点を置いた管理を実施することも重要である。

このように、保安活動の計画段階で重要系統・機器を絞り込み、重要度に見合ったリソースを投入する保安活動計画を立案すること、また実施段階で保安活動の結果生じた問題や生じる可能性のある問題に対してもその重要度に応じて無駄のないリソースで対応することは、効率的・効果的に安全性を向上させる上で極めて重要である。

上記の考え方は前述の NRC の Risk-informed Regulation と Performance-based Regulation にも見られる方法であると考えられる。前者は原子力発電所全体を俯瞰し確率論的リスク評価 (PRA) の結果等を含むリスク情報を活用して安全リスク上重要な系統・機器とそれに関わる活動や操作、措置などを特定しその結果に基づき規制する方法であると考えられる。また、後者は発電所運営の結果生じた事象や問題に対して重要度分析を実施するとともに (SDP: Significance Determination Process)、それにどう対応するか検討し (PI&R: Problem Identification and Resolution)、その結果に基づき規制する、いわゆるパフォーマンスを見て規制する方法であると考えられる。従来のような保安活動のプロセスを追ってそのステップ毎の妥当性をチェックすることによって安全性を確認する方法ではリソースがいくらあっても足りないということになる。

4.2 安全性向上活動において目標を設定する意味

前述の「3.2 (2) 具体的目標の設定」で述べた内容は、

時間の経過とともに目標や目的を見失いがちな人間特性が表面化しないように、具体的な目標を設定し、継続してその達成に取り組まざるを得ない仕組みを確立し、その仕組みを動かすことによって目標達成に取り組んでいくとする考え方である。

人間系による保安活動は、それを継続的に実施していくことによって安全を確保する活動である。しかしながら、この継続的活動によって安全を「維持」して行こうとすると、そこに気持ちが安住し、気が付いたときにはその現状すら維持できなくなり、失敗しているという、人間社会の中でよく発生する事態が起こりかねない。安全性を「維持」するには、常に安全性を「向上」させて行こうと努力する必要があると言うことである。日本の政治学者で思想史家の丸山真男が言うところの「である」論理と「する」論理である^[16]。これは、前述の人間の本質的な特性に根差すものであり、変えることのできない性質であると考えられる。このため、長期間に亘って何かの目標/目的を達成しようとする場合、目標を予め設定し、その達成に向かって試行錯誤を繰り返し (PDCA)、努力し続ける方法を採用する必要がある。

以上、目標を達成しようとする人間の活動の仕組みを図示すると、Fig.6 のようになる。この図では一般論として人間の「日常活動」としたが、この活動の最終目標を

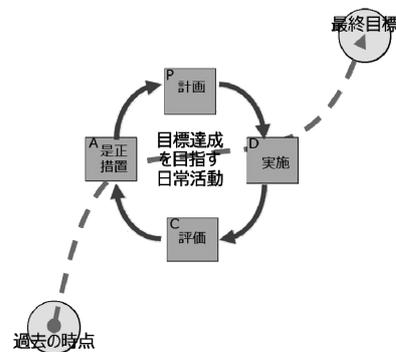


Fig.6 Safety Activities for Achieving a Final Goal

「原子力安全の確保 (安全性の確保)」とすればそれは「保安活動」となり、「経済性の確保」とすれば「経済活動」となる。保安活動の1つである保全管理活動もその目的は「『安全性』および『経済性』の確保」であるので^[17]、それぞれの活動がこの図のように表すことができる。その他の保安活動 (運転管理、燃料管理、放射性廃棄物管理、放射線管理など) も同様である。

感情を持ち生来怠惰な面を持っている人間は気持ちにムラがあり長期に亘って特定の目標を持ち続け淡々と努力することが苦手である。このため、目標を設定し現状とのギャップを明確にし、常にそれを確認できるようにすることは、それを解消し目標を達成するにはどうした

らよいか検討するきっかけを与え、それを解消するために努力し続けることを可能にするので、極めて重要である。また、目標は具体的なもの、あるいは客観性があるものが望ましく、可能であれば数値であることが重要である。目標の理解に主観が入ったり認識が異なったりすると、数多くの構成員からなる組織では考えていることがバラバラになる可能性がある。意志や意識を統一して力を結集して目標達成のための活動に当たることが難しくなる。したがって、客観性のある目標を設定することは極めて重要である。原子力安全の場合はそれが確保された時点でその状況に安住すると安全性の低下につながる可能性があり、継続的に安全性を追求し続けなければならないので、特に重要である。

このような考え方は、前述のNRCのROPや保全規則(10CFR50.69)^[18]の枠組みにも見られる。NRCが原子力発電所の安全性の維持・向上のために採用しているROPを見てみると、原子力安全が確保されている状態として「安全目標」が設定されており、各種の検査を中心とした手段を用いつつ「監視」し安全性確保策の「有効性評価」を実施し、その評価結果が規制基準やパフォーマンス指標を満たさない状況が確認されたら「強制措置」を含めて是正を事業者に求めるという枠組みとなっている(Fig.7)。また、保全規則も事業者が実施する保全活動に対し、対象系統・機器のパフォーマンスの「目標」を設定し、系統・機器のパフォーマンスを「監視」してその「目標値」を満たさない状況が確認されたら保全の変更「是正措置」を求める枠組みとなっている(Fig.8)。このように、NRCは安全性を確保する手段として人間の特性を考慮した実効性のある方法として保安活動に対する客観的な目標を設定し、その目標値と現状のギャップを

評価、確認し、必要に応じて是正を求めるという効率的・効果的方法を採用している。

4.3 安全性を向上させるメカニズム

前述の「3.2(3) 組織運営の仕方と役割分担」で述べた内容は、人間組織が機械系の安全性を維持・向上させるメカニズムを表していると考えられる。すなわち、組織全体の安全に関する方針と抽象的な最終目標を設定するト

ップマネージメント。その最終目標を具体的に明確な方向と目標

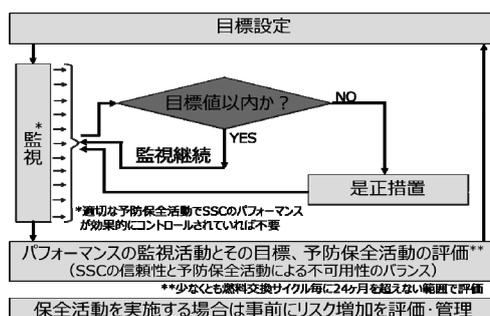


Fig.8 Framework of NRC Maintenance Rule

標に変換しそれを指し示して牽引するリーダーシップ(すなわち、現状の打破・改善を通じて目標を達成するためにチャレンジするリーダーシップ)。多くの実務担当者による保安活動が円滑に進むように関係各所と調整するマネージメント。そして、その具体的な目標に向かって駆動力を生み出す実務担当者による保安活動 PDCA。組織の構成員はこれらの役割を遂行できる能力を持ち合わせている必要がある。これらが組み合わさって安全性を向上させる推進力が創出されると考えられる。以上をまとめて図示すると、Fig.9に示すようになる。

この図を見ると、これはあたかも目的地に向かう自動車のようなものである。保安活動の実務 PDCA がパワーの源であるエンジン、実務が円滑に進むように調整するマネージメントが潤滑油、これらで得られた推進力の方向を目標に向けて牽引するリーダーシップがハ

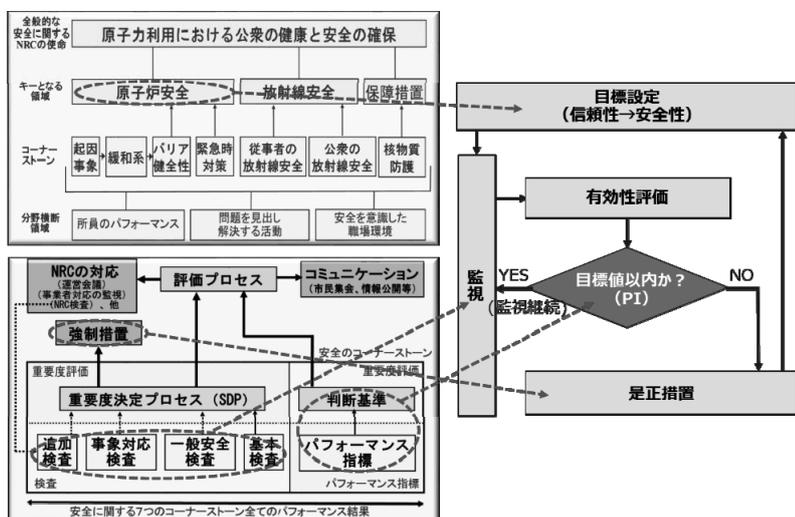


Fig.7 Framework of NRC Reactor Oversight Process

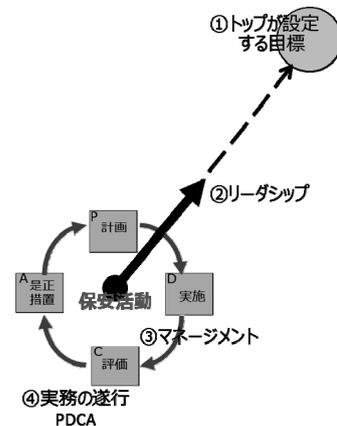


Fig.9 Mechanism of Generating Driving Force to Achieve Goals

ンドル、そしてトップマネジメントが設定する目標が自動車で行こうとしている目的地である。各役割を担った組織の構成員はこれらの役割を遂行できる能力や技量、経験等を持ち合わせている必要がある。このようにして、これら構成要素によって効率的・効果的に、あるいは迅速・着実に目標が達成され、それを長期に亘って継続できれば、安全性が格段に高まるであろうことは明白である。

このように考えると、組織を構成する各職位の構成員の役割などが明確になり、それぞれの機能を持つ構成員はどのような能力を持っていけば良いか具体的にどのように対応すればよいか等が明確になってくると考えられる。

トップマネジメントによる目標設定が重要であることは論を待たないが、トップマネジメントが示した目標を具体的な目標に落とし込み、それを傘下の構成員に説得力のある説明を行うとともに、それに向かって実行できる条件を確保しなければならないリーダーはたいへん難しい役割である。特にリーダーが設定する目標は新しい試みを要求するチャレンジングなものであるはずである。リーダーが設定した目標に向かって実務を円滑に進めるように調整し、それを傘下の構成員に説得力のある説明を行うとともに、実務を実行できる条件を確保しなければならないマネージャの役割も重要である。マネージャの傘下で保安活動の実務を担う数多くの実務遂行者は自分の役割を認識し、決められたことを決められたとおり迅速・着実に遂行することが重要である。(Fig.10) なお、上で述べた考え方は前述の IAEA 安全文化について述べられた文書の中に同様の考え方があることが見て取れる (Fig.11)。

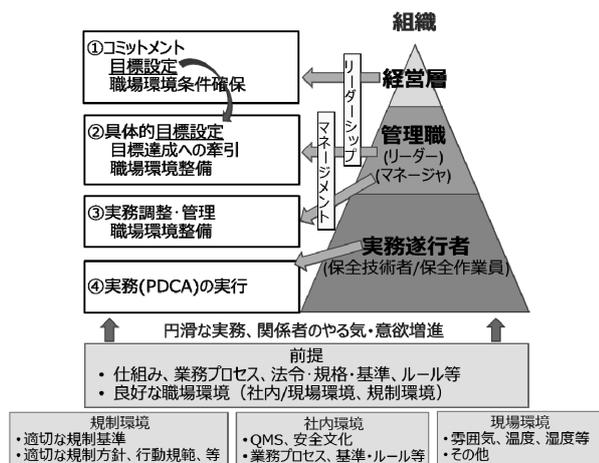


Fig.10 Organization, Job Positions and their Roles, and Work Environment

以上より、安全性を向上させるために必要な主要構成要素は、「目標設定」「リーダーシップ」「マネーメン

ト」「保安活動 PDCA」から成っていることがわかり、これらが有機的につながって安全性向上の駆動力を生み出すメカニズムを形成していると考えられる。また、上記のように安全性向上に関連する事項の理解を深めると、主要な構成要素やそれらを担う構成員が保安活動全体の中で果たすべき役割やその意味が明確になり、さらにこれらの役割を担う人に対する要件（能力、資質、技量、経験、人格等）も明確になってくると考えられる。

4.4 安全性向上活動におけるリーダーシップとマネジメントの意味するもの

原子力発電所の保安活動は多種多様である。また、それに関わる人も膨大な数に上る。したがって、共通の目標に向かって力を合わせ、分業の進んだ仕事を円滑に実施し迅速・着実に目標を達成する必要がある。とはいえ、組織を構成する個々人がその積もりになっても実際に日常業務を実施すると問題が生じる。このような場合は、組織のトップが概略の目標とその意図するところを明示し、主要部門のリーダーがその目標を具体的な目標に変換して設定しそこを目指して担当部門を牽引するリー

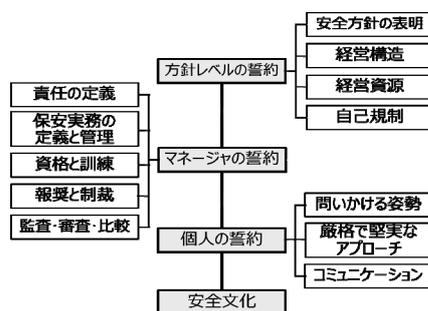


Fig.11 Structure of the Safety Culture

そして最後に保安活動を実際に行う高い実務遂行能力を持つ各担当部門の技術者や作業者が決められたとおり適切に実務を遂行する必要がある。

規制環境や社会環境等を考慮してトップマネジメントが適切な目標を設定しないと、組織は間違った活動を開始する可能性がある。日常の実務がうまく回転し順調に進んでもその方向がトップの設定した目標と整合していなければ本来の目標を達成できない。逆に具体的な目標に向かって適切に牽引するリーダーシップ（リーダー）があっても実務を円滑に回転させるマネジメント（マネージャ）が適切でなければ、成果があがらず、目標を達成できないことになる。トップマネジメントによる適切な目標の設定、リーダーシップ、マネジメントが重要である所以である。

上記は安全性向上のための組織運営の仕方と組織の構成員の役割分担を明確にし、個々の人がその役割に徹することにより、仕事を効率的に実施し迅速・着実に目標を達成しようとする考え方であり、下記がポイントであると考えられる (Fig.10)。

- 組織のトップマネジメントによる安全確保に関する方針と目標の方向性の明示
- 上記に基づく具体的な目標の設定とそれに向かって組織を牽引するリーダーによるリーダーシップ
- 保安活動を実際に行う数多くの実務者の意志や意識を統一し関係部署と調整して実務が QMS に基づき円滑に進むようにするマネージャによるマネジメント
- 安全の重要性をよく認識し、決められたことを決められた通りきちんと実施する意志と能力を有する数多くの実務者

これらはいずれも極めて重要な役割を持った組織構成員であるが、この中で多くの実務者の力を結集して目的地まで牽引するリーダーによるリーダーシップとマネージャによるマネジメントの役割は難しく、そして大きい。

前述の IAEA の基本安全原則は 10 項目の原則から成っており (Table 4)、原子力安全を確保する上でリーダーシップとマネジメントを重視している。原則 1 と 3 に着目すると、原則 1 は安全のための一義的な責任は原子炉施設

Table 4 IAEA Fundamental Safety Principles

原則 1: 安全に対する責任
原則 2: 効果的な法/行政の枠組み
原則 3: 安全に対するリーダーシップとマネジメント
原則 4: 施設と活動の正当化 (正味便益をもたらすもの)
原則 5: 合理的最高レベルの安全を達成する防護の最適化
原則 6: 個人のリスク制限
原則 7: 現在及び将来世代の防護
原則 8: 事故発生防止と影響の緩和 (レベル1,2,3)
原則 9: 緊急時の準備と対応 (レベル4,5)
原則10: 放射線リスク低減のための防護措置

と活動に責任を負う個人又は組織、すなわち事業者が負うことを要求し

ている。原則 3 は安全のための効果的なリーダーシップとマネジメントシステムが確立され、維持されることを要求している。特にマネジメントシステムにおいては、すべての階層の個人と技術、そして個人と組織の相互作用を認識することが重要であるとしている。これらのことは正に事業者が体制を整えて前述の安全性向上を推進するメカニズムと組織 (Fig.9, 10) により、継続的に安全性の向上に取り組むことを求めていると理解できる。

IAEA の「GSR Part2: 安全のためのリーダーシップとマネジメント^[19]」によると、安全のためのリーダ

ーシップとは、組織のビジョン、目標、戦略、計画及び目的を定めかつ統合すること、安全に関わる個々の構成員が電離放射線の悪影響から人と環境を守ることにについてコミットするよう中心となってリードすること、IAEA 基本安全原則を支持し、どのような行動が期待されるかを明確にし、さらに強固な安全文化を育成すること、であるとしている。また、安全のためのマネジメントとは、効果的なマネジメントシステムを構築し実践することであり、そのマネジメントシステムは安全に対する要件が定められ、ヒューマン・パフォーマンス、品質及びセキュリティに対する要件を含む他の要件と整合して適用され、他の要件及び要求を満たすために安全が妥協されるようなことがないようなものでなければならないとしている。

以上より、安全性向上の駆動力を生み出す「目標設定」「リーダーシップ」「マネジメント」「保安活動 PDCA」のうち、「リーダーシップ」と「マネジメント」は確実な安全性向上を実現する上で特別重要な事項であることがわかる。この 2 つの役割を担う構成員は特別の能力、そして多くの構成員の力を結集するために必要な人格・人望が求められる。

4.5 安全性向上活動において良好な職場環境を整備・確保する意味

前述の「3.2 (4) 良好な職場環境の整備・確保」で述べた内容は、精神的にも物理的にも良い環境を整備し、気持ちよく仕事を進められるようにすれば、保安活動を担っている個々人の能力を遺憾なく発揮させることが可能となり、その結果、迅速・着実に目標を達成できるようになるとの考え方である。

数多くの構成員が集まって意思統一し、1 つの目標に向かってそれぞれが自分の役割を適切に実施し続けるには、業務を遂行するための仕組み、業務プロセス、社内規程やルール等を含む QMS が確立されており、それらが組織内に明示され、構成員に共有されていることが必要であることは言うまでもない。これは保安活動の前提であり、これが機能すれば安全性は向上すると考えられる。その上でもう 1 つ欠かすことのできない重要な条件がある。それは職場環境である。

ここでいう職場環境とは、現場や執務室内の物理的環境、そして人間関係を含めた社内環境は言うまでもないが、規制機関が作り出す規制環境 (法律に基づく規制機関の規制方針、規制制度、規制基準、規制プロセス、行政指導、規制判断、行政手続き、過去の規制実績、行動

規範²など)も事業者およびその傘下の関係者の士気や意欲に大きな影響を与える。さらに社会からの批判を含めた社会環境も影響を与える。(Fig.12)

人間は機械と異なり感情を持っている。物理的あるいは精神的環境が悪いとパフォーマンスが低下する。士気が上がらず、モラルの低下を招くこともある。しかしながら、逆に良い環境を整備し快適で気持ちよく仕事ができる良好な職場環境を作りあげれば、士気が上がり仕事に対する意欲が増し、その結果として格段に仕事のパフォーマンスが向上する。このような例は世の中でたびたび見聞することである。

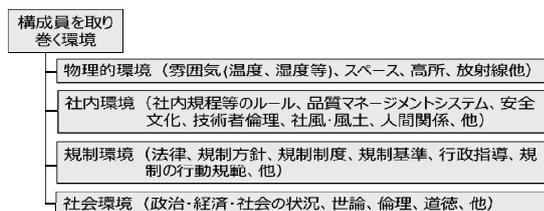


Fig.12 Environment Surrounding the Members of Safety Management Organization

以上述べたことは、原子力発電所の保安活動にも当てはまると考えられる。もしそのような良好な職場環境が確保されれば、構成員のやる気や意欲は格段に高まり、高いパフォーマンスを引き出すことが可能となり、原子力安全の向上につながると考えられる。

以上をまとめて図示すると、Fig.13 のようになる。

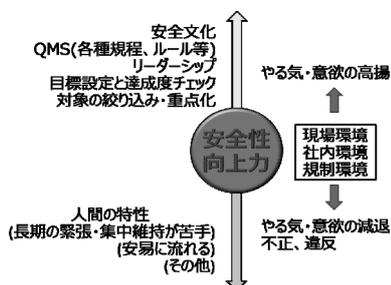


Fig.13 Driving Forces Enhancing

5. 結言

本研究では、原子力発電所の安全性を向上させるメカニズムや安全を向上させるために必要な条件等に着眼して検討を進めた。原子力安全について考える場合、それに影響する要素は多種多様であり、幅広く奥深いものがある。そのような中で原子力安全に影響を与える要素のうち、影響度の小さい「枝葉」ではなく、影響度の大きい「幹」となるものを追求し見つけ出すことは極めて重要

である。その本質がわかれば、的を大きく外さずに安全への備えが可能となる。すべてを網羅的に、しかも完璧に整備し危機に備えることは、如何なる組織でも不可能であり、それを追求し過ぎると、過去に経験した「絶対安全の追求」とどこか似た状況を生み出すに違いない。却って真の安全確保から遠くなってしまい兼ねないのである。安全性を確保する上で「幹」となる考え方や方法、必要不可欠な最低線の条件を知り、それを確保した上で、さらに安全性を追求し続けること、これが重要である。

人間はその特性上、原子力発電所のような大規模複雑システムの安全性を長期に亘って維持し続けること、組織を構成する数多くの個人が集まり1つの目標/目的に向かって意思を統一し協調して安全性を維持し続けることは苦手である。そのような人間・組織の負の特性が表面化しないように、組織が安全性を向上させるメカニズムをよく理解し、それに整合した仕組みや組織構成員の役割分担、業務プロセス、ルール等を確立すること、そして安全性を維持するのではなく、向上させる取組みを常に展開していくことが重要である。

参考文献

- [1] IAEA, “Fundamental Safety Principles”, Safety Standards Series No. SF-1, 2006
- [2] IAEA, “Safety Culture”, Safety Series No.75 -INSAG-4, 1991
- [3] IAEA Home Page, “Culture for Safety”, (https://www.iaea.org/sites/default/files/culture_for_safety_leaflet.pdf)
- [4] USNRC Home Page, “How we regulate”, (<https://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory.html>)
- [5] USNRC Home Page, “Risk and Performance Concepts in the NRC's Approach to Regulation”, (<https://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/risk-informed/concept.html>)
- [6] USNRC, “Reactor Oversight Process”, NUREG-1649, Rev. 6, July 2016
- [7] 金子修一, “我が国の検査制度の見直しの基本的考え方と具体的な仕組み”, 第4回 日本電気協会原子力規格委員会シンポジウム, 2017年6月14日
- [8] 原子力規制委員会: “実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(平成二十五年原子力規制委員会規則第五号)”, 平成三十年六月八日公布(平成三十年原子力規制委員会規則第六号)改正

² NRC は科学的合理性や人間特性の適切な理解の上に規制の枠組みを構築し、効率的・効果的な施策を実行してきたが、このことにより、米国の原子力発電所は安全で安定した運転実績を残すようになったと考えられている。このため、NRC は世界の原子力界から信頼と尊敬を集めるようになってきているが、その行動規範とも言うべき「良い規制の原則」^[20]はNRCによる原子力規制がなぜ成功したのかを物語っている。

- [9] 原子力規制委員会: “実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則(平成二十五年原子力規制委員会規則第六号)”, 平成三十年六月八日公布(平成三十年原子力規制委員会規則第六号) 改正
- [10] 原子力規制委員会, “安全目標を参照した原子力安全の持続的な向上の取組について”, 第32回 原子力規制委員会, 平成25年3月6日
- [11] 原子力規制委員会, “「安全性の向上のための評価」について”, (<http://www.nsr.go.jp/data/000120693.pdf>)
- [12] IAEA, “Human and Organizational Factors in Nuclear Safety in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant”, International Experts Meeting, 21–24 May 2013, Vienna, Austria
- [13] Monica Haage, “Managing Human, Organisation and Technology – Achieving a Systemic Approach to Safety” (<http://2015.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/materials/4/Hage.pdf>)
- [14] USNRC, “10 CFR PART 50 - Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities”,
- [15] 原子力規制委員会, “発電用原子炉の“設計・建設段階の安全規制”と“運転段階の安全規制” (<http://www.nsr.go.jp/activity/regulation/reactor/index.html>)
- [16] 丸山真男, “日本の思想”, 岩波新書, 1998年10月15日 第72版
- [17] Takayuki Aoki et al., “Study of the Optimization of Maintenance Plan for Nuclear Power Plants”, E-Journal of Advanced Maintenance (EJAM), Vol.6No.1 (2014) p.1 - p.13
- [18] NRC Regulations 10CFR, “§ 50.65 Requirements for monitoring the effectiveness of maintenance at nuclear power plants”
- [19] IAEA, “Leadership and Management for Safety”, IAEA Safety Standards, No. GSR Part 2 (2016)
- [20] USNRC Home Page, “Principles of Good Regulation” (<https://www.nrc.gov/about-nrc/values.html>)
- (2019年6月15日受理、2020年3月3日採択)