

特集 巨大構造物の事故防止と保全**保全学の構築に向けて**

Academic approach for the maintenance activity

本陣 雅夫

(東京電力(株))

伊藤 晴夫

(日本原子力発電)

Masao HONJIN

Haruo ITO

1 はじめに

20世紀は人間生活向上のため、人間が技術的に作り出した巨大人工物が次々に現われた時代だった。これらの源をなす電気エネルギーは産業構造を変え、大量生産大量消費の基盤を確固たるものにした。自動車の大量生産、さらには新幹線、ジェット機による大量輸送そして、テレビジョン、コンピューターによる迅速な情報通信網、この技術スピードが地球を小さくしているとも言える。誰もが日々その便利さを享受しているが、科学技術の発達はプラス面とマイナス面があり、一方では有限資源の枯渇、大気汚染を招いている現実も直視しなければならない。特に地球環境への影響は深刻なものがある。

21世紀に向か、エネルギー資源の将来を考える時、環境負荷の小さい原子力発電は不可欠のものと考えられる。勿論、原子力発電にも功罪はあるが、実用化された技術としては、当初から安全第一で「石橋をたたいて渡る」式の手法を取ってきた唯一の技術であり、ダウンストリームの課題も必ずや解決されて行くものと確信している。しかし、原子力発電が今後ともマーケットで使われるには安全第一ながら経済性も重要な要因となる。こうした状況の下、電力生産を生み出す原子力設備の保全のあり方についても、今一度、大局的に俯瞰して、最適設備運用のより具体的な提案を行い、一つの案や指標を示し、広く意見を聞き、形あるものにしていくことが、強く求められている。

設備の安全・保安のあり方については世界的に議論されてきたが、保全の具体的取組みや仕組みの確立においては、それぞれの国の歴史・文化・価値観・国民性等を反映した結果となっており、いまだ確固としたものが現状である。安全・安心は高ければ高いほど良いという一般性が失われることはないことか

ら、公益性と経済性とのバランスを誰がどのような方法でどこに置くかによって、置く場所もその値も違ってくると思われ、ここに保全のあり方をひとつの学問として考える価値がありそうである。この章では、原子力保全の特徴を踏まえ、保全最適化の道標としての「保全学」構築に向けた考察を行う。

2 最近の原子力発電所の保全

原子力の基本的な安全性の考え方は、「止める。冷やす。閉じ込める。」と言う放射性物質の系外放出防止が基本であり、設備の設計時点からこれら事故拡大防止の仕組みが作られている。しかし、技術に絶対安全はなく、設備も物理的構造物である以上、供用期間中の種々の負荷により劣化するのが一般的であり、これを維持するのは適切な規制と適切な運転員教育そして適切な保全であると言える。

過去の徹底的な事故原因の究明と電力業界全体の細部にわたる水平展開が功を奏し、原子力発電設備の故障率は他産業に比し極端に低い状況にあるが、故障の大小を問わず、原子力なるが故に少しの設備故障も社会的影響が大きく、話題にされる性質は今も変わっていない。特に一次冷却水の漏出については気をつけねばならない。安全が社会的安心につながるためにには徹底した情報公開による国民的合意形成の必要もあるが、この過程では技術の透明性が重要で、設備の保全管理技術についても透明性や説明責任が求められていると考える必要がある。原子力発電所の保全が他産業と大きく異なる点に放射線に対する防護養生があるが、近年の除染技術や防護技術の革新は著しいものがあり、修理・取替技術や保全管理技術の進歩とあいまって、最近では PWR での SG 取替工事や BWR でのシャウド取替工事のように、従来、原子力だから困難と

考えられていた構造物、機器も比較的簡単に、取り替えたり、修理したりできるようになってきていている。これらをわかりやすく説明することも大切である。

一方、最近の原子力を取り巻く社会情勢は大きく変化しており、本格的な電力自由化競争時代を迎える。原子力と言えども発電コストを意識した保全管理の必要性が高まっており電源確保と財産保護の観点、および経済性、特にコストミニマムの観点からの設備の点検、保守、補修、改良、更新を発電計画に基づいてのプラントライフサイクルを通して最適にするような運用管理が求められている。既に定検の高度化(定検期間短縮)、オンラインメンテナンスの拡大等についてのチャレンジが行われている。その他の課題としては現状の分解点検中心の保全が過剰保全になっていないかと言うこと。すなわち、機器の状態を内外から確実に検知する設備診断技術(劣化検知、劣化予測)等を活用し、本質的に理屈が通る状態基準保全への移行による無駄のない合理的な保全の検討である。又、どの機器も同じグレードで点検するのではなく、重要なものはより厳密に点検し、そうでないものは合理的に行う総合的な経済性を考慮したリスク重要度保全の適用等についても検討の余地がある。そして何よりも大事なのは設備劣化、故障を大事に至る前に検知し、トラブルを未然防止することである。

日本で最初の原子力発電所が運転開始後、30年余が過ぎ、この間、いろいろな知見、経験・技術、データが蓄積されてきた。そろそろ、これらを有効活用し設備を如何に効率的に使って行くかという保全の総合的な体系化の時期が来ていると思うのである。この観点から、我々は、日本機械学会の研究協力部会軽水型原子力発電所保全研究分科会の中で、産業界では一般的な「保全」という用語をあらためて定義して、プラントライフサイクルを通じての経済性や社会性の分野を含めたより広い概念として考えてみようという前提で前向きに議論してきた。現在までの議論に基づいた保全の定義とその目的を以下に示す。

● 保全とは

生産向上と安全性確保の両面からプラントの生産行為に直接、間接に関わる系統設備が、設備全体として効率的に本来の目的を果たすように、個々の設備機器を、その機器の重要度に応じ総合的な経済性を図りながら維持向上させる行為を言う。

具体的保全活動は、適切な方法を用いて機器状態を観察、診断及び点検し、その健全性評価及び性能評価

によって当初設計据付状態からの有意な変化(劣化、性能低下あるいは機能喪失等)や兆候が認められた時、設備本来の目的に照らし、設備運用面の見直し、機器の性能や機能の回復措置および効率や信頼性をより高めるための改善・改良などの行為を最適に組合わせて行う。また、新たな技術開発、知見に基づき行う設備本来の目的に添った改善・改良等の行為も保全に含むものとする。

● 保全の目的

- 公共の安全確保と原子炉の安全確保の観点から、原子力発電所設備に要求された機能を満たす状態に維持すること。
- 電源確保と財産保護の観点、および経済性、特にコストミニマムの観点から、設備の設置、保守、改良、更新を発電計画に基づいてプラントライフサイクルを通して最適にするように運用管理すること。

3 「保全学」構築のニーズと理念

原子力発電所では数多くの保守点検、改良、改造工事等が行われているが、これら保全は学問的体系として確立しているものではなく、むしろ経験の積み上げとして実際的に運用されて来た分野である。一般に保全活動は多様であり、それを体系化、定量化することは難しいといわれている。いくつかの企業においては、保全活動の体系作りが行われ、各種の保全システムが販売されているが、各企業に特化したものとなっており、標準化までは至っていない。現実には企業形態が変わると保全目標も異なるし、また、同じ機器についても、業種によって点検レベルや、点検周期は各社まちまちである。保全要員にしても、アウトソーシングによる合理化を図ろうとする会社もあるし、自社に保全技術を温存するため、人件費は若干高くつくが、自社要員を育成しようとする企業もある。

しかし、手法や目的は異なっても、保全に対する何らかの道標的な学問は必要である。保全についてもその技術問題を論じるという点では、設備の劣化事象に着目し、物理的、工学的な視点から故障メカニズムを解明し、信頼性向上、保全性向上に役立たせる故障物理や信頼性工学と言った学問分野がある。しかし、原子力保全を取り巻く状況は、技術的側面のみならず、人的側面、経済的側面、社会的側面が相関をなした一種の複雑系の様相を呈しており、これらを総合的に考

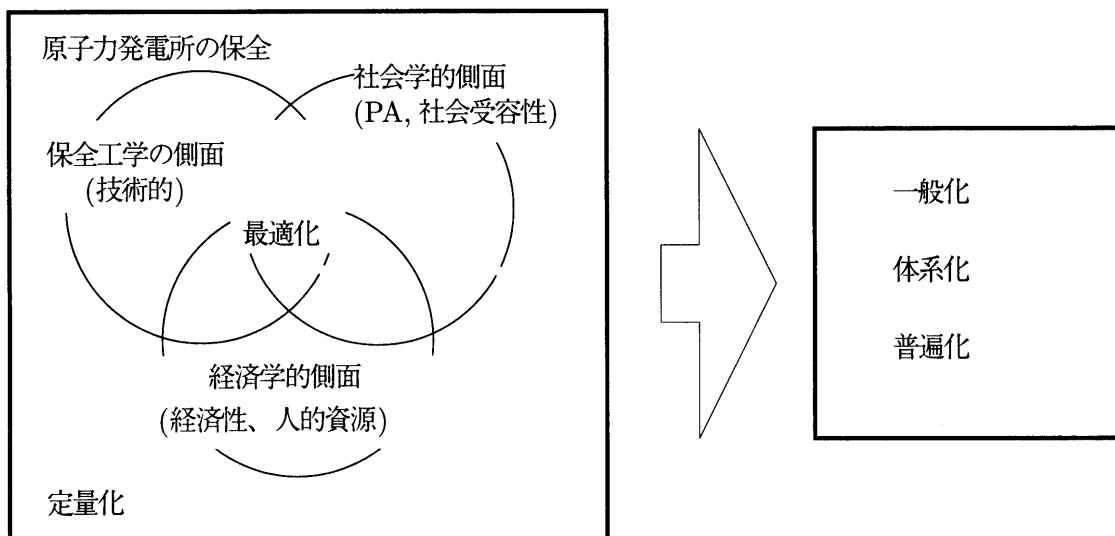


Fig. 1 保全学の概念

え、設備を合理的に運用しようと言う学問は、まだ、存在していないと思われる。ここで考えている「保全学」は、一定の理論に基づき、種々の要素が相関し合う保全構造を体系化された知識と方法で総合的に最適化するためのひとつの足がかりを提示しようとするものである。そしてこれにより、広く社会に認められ普遍化された保全活動を行えるようにし、またその戦略的使い方により「信頼性マキシマムーコストミニマム」の最適保全の実現を期待するものである。

原子力は過去多くのトラブルを経験したが、関係者の英知と努力により、トラブルも減少し、外国プラントと比べてよい成績をあげている。しかし、このために多くの費用と、労力をかけてきた。原子力と、経済性がなければ成立しないことは論を待たない。我々は今、より信頼性を向上させつつ経済性をも向上させることにチャレンジしようとしている。この考えは一見矛盾しているように思う人もいるが、決してそうではない。今までをすべて良しとするのであれば、改善も進歩もない。従来のやり方に無駄がないかを再評価し、その中から最適手法を見つけることに原子力界がこぞってチャレンジすることである。これから初めてやろうとすることなのである。ここにこの考え方を統括する保全学構築のニーズがあると言える。

国民の大部分は、原子力に対し、「よくわからないが不安」というイメージを持っている。確かに原子力のような巨大技術はどんどん細分化し専門家でないとわかりにくくなっている。国民の信頼と安心の獲得

のため、どのように安全が技術的に保たれているのか等の考えをわかりやすく提示する方法論としても保全学は有用であり、21世紀に継承できる原子力エネルギーとしての総合性を高めるための学術としての体系化と言える。先に述べた保全研究分科会では、これらの議論を通して、保全学とその構築の理念を次のように定義した。Fig.1はその概念イメージを示したものである。

● 保全学

工業生産に応用して保安と生産力を向上させるための応用技術としての保全を一定の理論に基づいて学問的に体系化した知識、方法をいう。科学技術の範囲にとどまらず広く経営学、社会学との学際に拡張した広義の概念。

● 保全学構築の理念

従来、保全活動は、設備を最高の状態に維持することを目標として、経験と運用をもとに逐次計画、実行してきた。これに対し、必要な保全活動の本質を分析し、定量的な評価尺度により、保全活動が持つ構造及び法則について「一般化」「体系化」をはかり、これらを更に「普遍化」した形で表現し、定量的評価に基づいた保全活動を計画、実施可能とすることを保全学構築の基本理念とする。

具体的には、プラントライフサイクル全般にわたり技術的、人的、社会的、経済的な側面からプラント設備を中心とした保全活動の適正化を行い、安全性、信頼性、経済性をより一層向上させ、原子力発電所の社

Table 1 言語と保全の特徴比較

共通的な特徴	言語	保全
1. 構造体系を持つ	単語・文の記号体系	部品・機器からなる設備体系
2. 意図性が有る	自由に表現できる	部品の選択自由
3. 文節性を持つ	単語、文字の組合せで意味	部品・機器組合せで機能創出
4. 超越性を有する	過去、未来の表現	機能の実現、性能発揮
5. 共時態/通時態がある	同時代的言語/歴史的言語	現時点の保全/高経年管理
6. 普遍形式が有る	ラング（言語体系） パロール（話すという具現化）	保全ラング（保全体系） 保全行為（体系の具現化）
7. 時間軸/空間軸を持つ	意味創生/辞書・文法	保全計画/基準・工学的なもの

会的信頼性と受容性向上に貢献することである。

4 保全学としての体系化

保全を学問として成立させ、合理的、経済的なものとして体系化するための考え方については、既に冒頭の「保全の体系化に関する一考察」で述べられている通りである。技術者の経験と実績に裏打ちされた現在の保全は、第一義的には原子力プラントを構成する機器群とそれらの保全要員の2つから構成されており、第二義的には安全性・経済性の制約条件の下、電力エネルギーの生産という目標を達成するために実行される「保全行為」から構成されており、第三義的にはこの「保全行為」が内容的に構造化されているというものである。この構造化された保全の中に、我々が今までに気がつかなかった法則や原理があると思われるが、これらの原理、法則を発見したり、創成したりすることが「保全の体系化」につながっていくことになると思われる。そして、技術的課題である経年劣化の予測ができるようにすることと、この合理的に分類された体系の中から保全最適化のための戦略的方法を見つけることである。ここでは、幾つかの体系化手法を考えてみたい。

4.1 言語学の構造変換を利用した体系化

これは、保全を学問として成立させるため、経験の奥に潜む事物の論理に着目し、言語学の有用な法則の支援を借りることを基本とするものである。Table 1は言語の持つ特徴と保全の比較をしたものである。言語は、単語と文からなる記号的な構造体系を持っており、それらを自由に使い、意味を創出し、過去や未来を語ることができる。保全も同様に部品、機器からなる設

備体系を持ち、どのメーカーのものを選ぶことができ、部品機器の組み合わせで機能を創出し、将来に渡って性能を発揮できるし、両者とも共時態と通時態を持っている。また、言語は普遍形式を持っており、この言語体系がラングであり、そしてパロールとしてこの体系を使い話すと言う具体的な行為が行われている。

言語処理は時間軸にそって言葉を組み立て展開する操作を含み、その時、小道具として頭の中に入っている辞書や文法を使い実行される。即ち、時間軸と空間軸の2つの直行する軸を持っている。時間軸については、言語学ではコミュニケーションを行うために、まず単語を組み合わせ、文の構造を作る構文即ち統語処理と言う概念化を行う。次にその文を実行するため、発音でそれを伝える。そして意味解析のための意味処理、文脈処理が行われ、最後に周りの状況や相手の意図を推定し、相手に適切に伝わったかどうかという解釈を選び出すわけである。

保全も文章を作るのに良く似た構造を持っており、設備の運用管理と言う観点では保全を計画し、それに基づき実施し、その差分を評価し、また次回計画に反映するという時間軸に沿った行為が行なわれている。空間軸は夫々の時系列の深さを表す軸で、実際、様々なレベルの情報が相互作用のもと、判断に基づき処理されている状況がある。この体系的考え方の下に、保全技術面でのラングを 3×3 マトリクスに表現したのが、Table 2 の例である。この他にも、経済面、人的面、社会面での保全ラングがあり多くの保全行為とその関係がこのマトリクスにより整理できそうである。

保全ラングの有効性を検証し、いかに戦略的に使っていくかはこれからの課題であるが、自然言語処理が自然言語に関する様々な知見を何らかの計算理論に基

Table 2 技術面の保全ランク (例)

時間軸 空間軸	計画	実行	評価
対象 機器の集合 属性 方式的なもの	1.1 対象機器 ・系統、機器、部品（名称、機能等） ・重要度 ・保全方式（頻度、方法）	2.1 実施項目（行為） ・状態監視 ・分解点検 ・補修・取替 ・検査・試運転	3.1 評価項目 ・劣化状況 ・保全内容（頻度等） ・保全資源（人、費用） ・保全計画の妥当性
分析 相互関係	1.2 事象分析 ・故障物理 ・劣化メカニズム ・安全工学・信頼性工学 ・リスクベース技術	2.2 保全技術 ・設備診断技術 ・点検技術 ・補修・取替技術 ・検査技術 ・工程管理技術	3.2 評価方法 ・予知・予測技術 ・数理保全 ・新技術知見 ・保全データベース
基準 判断の集合	1.3 判断基準 ・規制・法令 ・技術基準 ・機能維持限界 ・リスクベース基準	2.3 実施基準 ・判断・判定基準 ・点検基準 ・廃棄物減容基準 ・（線量低減基準）	3.3 評価基準 ・生産性指標 ・安全・信頼性指標 ・（経済性指標） ・（P A指標）

づいて情報処理システムに組み込むように、保全ランクの 3×3 マトリクスに保全演算子を導入し、マトリクスの要素を目的に応じてクラスタリングし、目的変数と原因変数を明確にした数学モデルを作成、コード化し、計算機処理による最適解を求めることが可能になるのではないかと思う。例えば、機器の集合、属性から、重要度を計算し、適切な保全方式を与え、その点検内容を合理化する。そしてこれに関係する人的面でのランクや経済面、規制面からなるランクの要素を関係づけ、最適な保全費を出す。一方安全性・信頼性の観点からリスク計算を実施し、夫々の評価指標とともに安全性と経済性のバランス点を見つけ最適化を図ることも可能となろう。

4.2 保全最適化プロセスとしての体系化

保全のような複雑な構造を数学モデルで表わすことは、そう簡単なことではない。このため、図やフローシートなどの図式モデルで体系化を図る考え方がある。ここに示したのは一般的に基本となるデータベースから、目的（目標）達成に至るまでの抽出・分類・最適化のプロセスを体系化と考え、目指すべき個々の要因（個別目的）を抽出・設定し、各要因（信頼性・安全性・経済性・社会的受容性）別に最適化を検討し、これら

の個別目的を総合的に評価した上で、「原子力発電所の保全のあるべき姿」を考えるものである。この概念をFig.2に示す。

4.3 信頼性指標を考慮した保全の体系化

これは、文章によるいわば記述モデルによる体系化の一例である。今、一つの試案として、原子力の信頼性を設備を中心にその事故レベルや損失レベルを絡め、3つぐらいの信頼性指標レベルを設定して保全を考えて見る。Fig.3は指標レベルの相関図である。

レベルⅠは設計・製造技術、運転管理技術、保全管理技術が同一のフェーズで構成され、設備そのものに関係（多分にハード面から）が深い技術要素である。このレベルでの故障は、機器の不具合、運転のミス、初期欠陥等によるスクランプや計画外停止が考えられ生産支障には直結するが、他への影響は大きくないはずである。その信頼性レベル（ α ）を仮に-1と考えるいわゆる戦術やツールのレベルと考える。

レベルⅡは、レベルⅠに重層して、情報技術、人材面（ヒューマンファクタも含め）といった多分にソフト的色彩が強く応用技術の面を持った高等戦術に関係するものと考えられる。この段階で生ずる不具合に起因する事故は、放射性物質の漏失がイメージされる

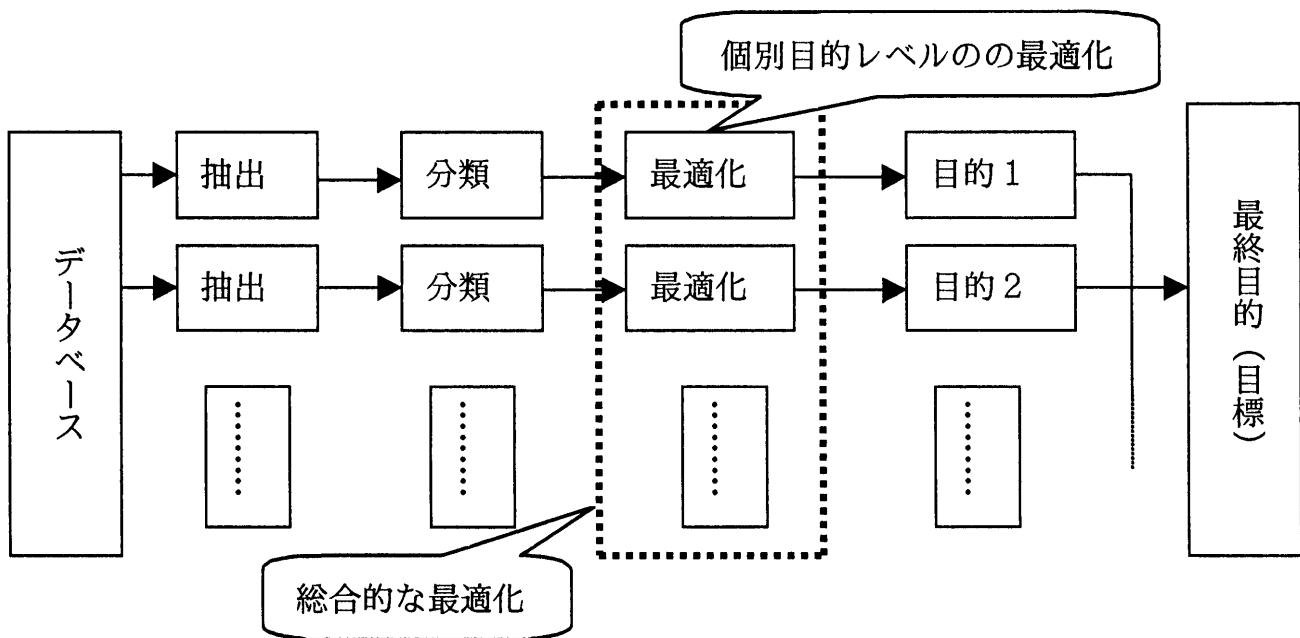


Fig. 2 プロセスとしての体系化のイメージ

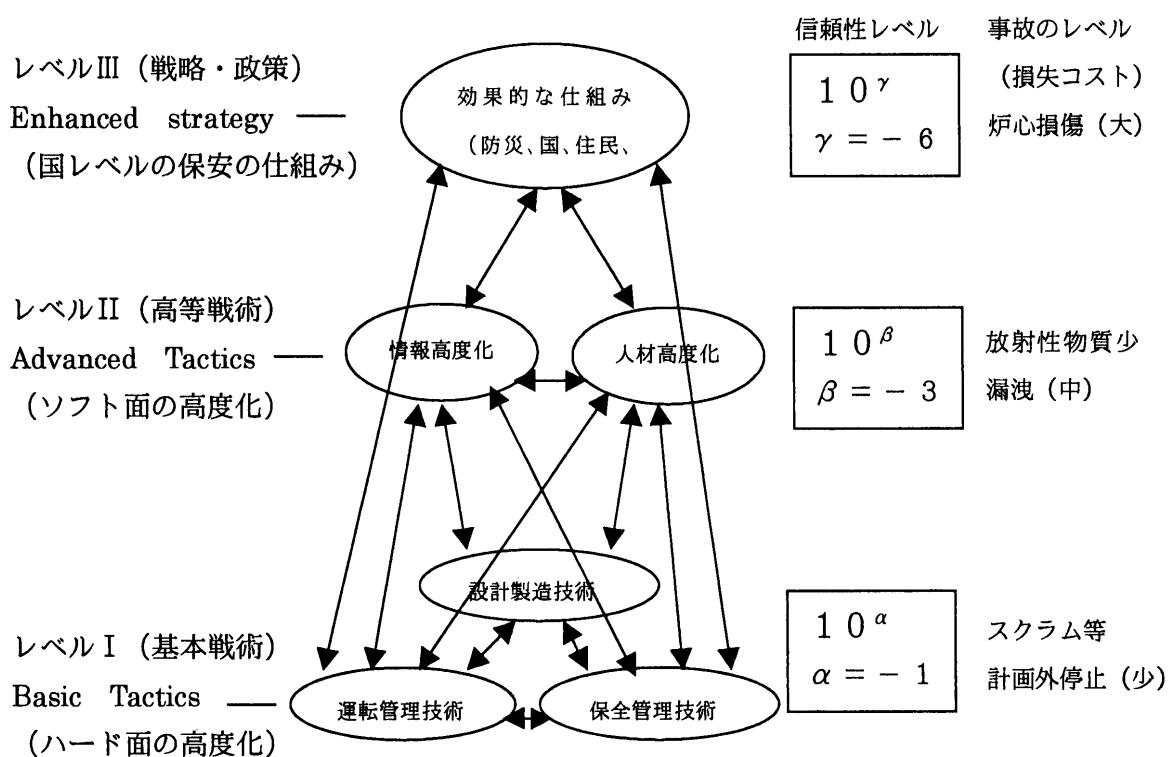


Fig. 3 指標レベルの相関図

中程度の規模であり、人体には影響はないものの信頼性レベル (β) は、約 -3 度と低くなると想定する。いわゆる現在の技術を組合せ情報機能面や人材面を高度化する事によって許容される高等戦術のレベルと考える。

レベルⅢは、レベルⅠ、Ⅱを絡め重複し、更に重層して設定する保安の仕組み、全体の品質保証活動、国、自治体、事業者の効果的あり方、防災体制、国民の理解等安全文化や国の行政をからめた戦略政策レベルである。この段階での欠陥による事故レベルは、確率的には 10^{-6} 炉年程度の炉心損傷溶融が想定され、損失額は、計り知れない程大きいと考えられ、信頼性レベル (γ) は約 -6 とかなり低くなる。

「保全学」の構築においても、この様な指標レベルを考え、どこを軸足にして展開すべきなのか具体的なコンセプトを示す必要がある。リスクレベル $\gamma = -6$ までいた保全戦略を展開しようとすると、会社レベルからだけの解析では不十分であり国全体の高度な判断が必要となる。コストミニマムの観点からは、レベルⅠ、レベルⅡ、レベルⅢそれぞれのなかで、独立的にあるいは関連してその最適解を見つけることも意義があるが、現実的には、 α レベルにおいてこのリスクを如何に小さくするか、かつ、コストも如何に少なくするかと言うバランス論になる。しかし、 α レベルにおいても信頼性を何処に置くかの方法論は必要であり、定量数値の合意形成だけでもかなりの議論がいるかもしれない。また、レベルⅠでは、設計製造技術、運転管理技術、保全管理技術の 3 つのフェーズの技術があり、これらが相互にあるいは独立して寄与しているため、単なる保全管理技術からだけの展開で、信頼性・リスクを議論するときは十分留意する必要がある。

5 保全学の具現化としての数理保全学

数理とは数学の理論で、俗に算数・計算のことである。数理保全学とは保全に関わる対象を数値データ、式や確率論を応用し、数学的な方法で保全を定量的に考えようとする学問である。基本的には、上述した体系化に基づき保全の構造を数式化し、関係因子を変数とした目的関数(方程式、法則)をつくり、境界条件を与えることによって夫々の解が得られ、保全の最適化につなげる保全戦略の総合評価(信頼性マキシマム・コストミニマム)を利用する考え方である。

保全活動を計画したり評価する時には、実際に多くの数値が用いられている。これらは、保全活動のそれぞ

れの目標を達成するための道具として使用されたり、同時に指標(目標の尺度)に使われる。たとえば、機器は一連の番号を付け管理されており、アイテム毎に作業者工数、工数単価、材料費が数値や符号として決まれば、工事計画としての保全コストが数値で算出される。機器に限定して考えると運転中の状態量や、定期検査時の計測値から、あらかじめ決定されたり予想される許容限界値、判定基準値等の差分を数値として知り、機器の残存寿命を予測することも可能である。保全の対象を定量化(数値化)しようとする場合の道具には確率があり、安全品質面を数値であらわしたり、リスク重要度や、リスク受容の程度を考えるときに使えそうである。

しかし、保全業務には数字に現れにくい人間の営みがあり、すべて数値に表すことが難しい面も在る。特に保全活動には各種のあいまいさや重複が存在しており、単なるマトリクス方式だけでは問題が解けないこともある(問題は、頭の中にある今までの経験則、蓄積された膨大なデータやノウハウ、或いは技術者の直感の様なものを如何に数値化できるかである)。また数値そのものにもあいまいさが存在する。たとえば、工事の入札金額のばらつきは、発注者と受注者の関係、受注者の能力、単なる競争見積もりの問題だけでは済まされない。機器の重要度と点検周期の関係のように数値としての不連続な例もある。重要度を設定し、それに応じた点検周期を設定するのは一般的なやり方であるが、これは連続と思われる現象を人の判断により割り切って、不連続にしている例である。判定値、許容値の取り方もそうである。例えば、漏れの判断において、どのレベルで、プラントを止めるかと言う判断は、周囲の思惑に左右されるところがあり、一見不連続と思われている現象でも人の約束事が入ると意外と簡単でない。

フラクタルのような不規則、不安定な減少はたとえば、カオス、エントロピー、揺らぎ、あいまいなどとも呼ばれているが、保全の場合も同様の複雑な現象は多く見られる。フラクタルはひとつの考え方過ぎず、フラクタル次元もひとつの道具に過ぎないが使い方によっては保全面でも活用できそうである。これらのあいまいで複雑な相互作用を取り扱うオブジェクト指向の情報処理技術も進展しており、後述される「仮想プラント」のように、今は不可能と思われるものが実現化する可能性は十分ある。

すなわち、数理保全学とは、保全に使われる数値、

相関式を考えられる数学(統計学、解析学、フラクタル次元等の情報処理技術等)をうまく統合して、モデルを作り実際面に応用する学問であると言える。

6まとめ

「保全学の構築」はまだ、概念の域を出ないが、JCO の臨界事故にも見るように、原子力設備に対する運転・保守管理の重要性はますます高まっており、また、電力小売部分自由化がスタートする等、原子力を取り巻く外部環境は大きく変化している。我々が今まで取り組んできた原子力保全の裾野は実際に広く、課題も山積しているが、原子力の安全性と経済性を両立させ、社会的受容性をより向上させるため、関係各所相互の横のネットワーク化を図り、今後とも産学協同で「保全学」の完成に向けた継続的な取り組みが必要である。

参考文献

- [1] 岡村辰雄: 保全と数量, 科学図書出版.
- [2] 岩波講座: 言語の科学.
- [3] 保全学の体系化に関する検討: 日本機械学会研究協力部会・軽水型原子力発電所保全研究分科会・構築検討会.