

分析論文

保全学の構築に向けて(1)

慶應義塾大学・宮 健三
Kenzo MIYA

日本原子力発電株式会社・青木 孝行
Takayuki AOKI

普遍学国際研究所・高瀬健太郎
Kentaro TAKASE

関西電力株式会社・千種 直樹
Naoki CHIGUSA

1. はじめに：普遍性と階層構造

原子力発電設備でとられている保全の基本原理の中に「階層性」と「階層原理」を導入できないかという命題は検討に値する。階層原理とは、例えば原子力プラントが電力を生産するまでにたどるプロセスは、設計と建設と運転管理、の三つの部分からなり、それらが階層的な役割を果たしながら全体として電力の安定供給という機能を果たしている仕組みを言う。階層性が存在し階層原理が正常に機能すれば、設計、建設、運転管理の三つの行為が適切に機能し、その結果電力は正常に国民に供給される、という目標が達成される。運転管理が保全に関係するのは周知である。ある構造が階層性と階層原理を有する時、そこには階層構造があるということにする。

この階層性と階層原理は、人間が構築した文化の至るところで活用されている。言語がまさしくそうであり、言語が論理を産み、論理が自然現象に関する物理学やその工学応用といった学術体系を支えている。これら全てがそのような階層性と階層原理を有している。この意味で、保全が伝統的な学術の仲間入りをするためには階層構造が導入されなければならないと思われる所以である。この階層構造は保全の体系化が持たなければならない基本的な特性である。

従って、普遍的なこの視点に立って、保全の構造を分析しそこに階層性があるのかどうか、階層原理がどのように機能しているのか、を調べてみると興味深い。このような新しい見方は、保全の体系化を図る上で有用である。保全の階層原理が時間と空間を体系的な拠りどころとしていることを示せれば、普遍性が確固たるものになるので、体系化の普遍性につながっていくと思われる。

2. 保全に見られる階層構造の例

2-1) [現象、法則、規格化]

自然現象を支配する規則には、用語として原理、法則、理論が用意されているが、それらは適用範囲およびレベルが異なる。始めに原理があり、原理から導出される法則がある。全ての現象は法則に従う。従って、現象理解の拠り所は法則にあるとして良い。良い例はニュートンの運動則である。森羅万象は美しくもあり神秘的でもあり理解しようとすれば複雑でもある。しかしこの世に存在する限りニュートンの運動則を満たす必要がある。現象の理解にとって法則は不可欠である。

そうでありながら、原子炉などの人工物を創造しようとするとき、ニュートンの運動則はほとんど役に立たない。それに反して理論は原理・法則から出発して対象を具体化して問題解決に直接対処できるようになっている。法則を限られた対象に適用して理論を構築する。法則から理論へ。この認識はとても貴重である。この良い例は一般的な弾性論とかそれを梁に対して単純化した梁理論とかである。原子炉プラントの構造設計にとってニュートンの運動則は直接的にはまったく役に立たない。梁理論になってはじめて役に立つのである。このように運動則から梁理論までを考えれば、ここに厳然たる階層性が存在することに気がつく。いわゆる原理、法則、理論という階層性である。梁理論は設計にとってなくてはならないものである。さらに、原子炉の構造設計・製造規格である告示501号が、梁理論よりかははるかに原子炉構造機器の設計に密着している。これは階層構造の発展である。法則から理論へ、理論から規格化へ、という発展形式が重要である。いわゆる学問が普遍的に持つ構造である。

2-2) [検査、評価、措置]

特に保全の基本的な行為である、[検査、評価、措置]には明らかな階層構造が見られる。これらの間にあって

は、文法に相当するものは何であろうか。検査に関して言えば種々の検査工学が、評価について言えば破壊力学が、措置について言えば補修工法が文法に相当するのである。[検査工学、破壊力学、補修工法]、これらがやはり階層構造を構成するのは明らかであろう。この点については後で改めて議論することとする。

2-3) [社会のニーズ、コストミニマム、信頼性マキシマム]

保全の特徴を決めている法則的なものは何だろうか。その答えは、発電プラントの保全の例では電力生産に対する [社会のニーズ、コストミニマム、信頼性マキシマム] の3点であろう。社会的要請は社会的必要性である。国民が必要とする製品を生産できる産業が関心である。ところで、コストミニマムや信頼性マキシマムという要請は保全に被さる制約条件と考えることができる。その制約はどこからくるのだろうか。

2つの理由が考えられる。製品の生産は人間の欲求を満足させることにある。人間の欲求には限りがないという意味で製品の生産は終わりのない閉じない目標である。製品は人間を幸せにするという閉じない目標を部分的にしか解決できない。相対的な人間の幸せを実現するのは比較的簡単である。昨日より地位が上がればたいていの人は幸せであるからである。しかし最高に幸せというのは実現できない目標である。限りがないからである。そうだとすると、ここには競争によってしかこの実現できない目標に近づく術はないことになる。したがってコストミニマムというのは人類が普遍的に持つ重要な制約条件である。さらに言えば、競争は失敗と成功の繰り返しである。失敗の中には失敗によってのみ成功が追求され、健全で強靭な仕組みが確立するという「逆説の論理」が潜んでいる事に気がつく必要性がある。もう一つの理由は、「する」論理の適用によって原子力の絶対安全に近づこうと努力することと同じで、絶えず従事者の「する」努力を要請する根拠にある。コスト削減は手を抜くことに繋がっているという誤解を得がちであるが、それは時間によってすぐに見破られるからコスト削減の真の解決策ではない。真の解決は合理的なコスト削減のための技術開発である。そして技術開発はこれもまた閉じていないのである。閉じた問題と閉じない問題。これは人間の取るべき対策を峻別する。

コストミニマムは空間的な行為である。それに対して信頼性の確保は時間的な行為であり、信頼性マキシマムの根拠は、絶対安全に近づくことと経年劣化すな

わち時間と戦うことの2つにある。

国民や地元住民の安心は安全性からだけでなく経済性も不可欠な条件となる。これは考えてみれば当然で、バランスのとれた安全と経済性があつて初めて国民の安心が得られるのである。これをマスコミや住民は勘違いしていて安全だけを過度に主張する。このとき電力生産は前提だからである。したがって、保全の適正化を図り、コストの低減を図るのは普遍的な人間の行為である。

したがって [社会のニーズ、コストミニマム、信頼性マキシマム] は階層構造を形成しており、人間があるいは会社といった集団が生きていくうえで必要な行為であることが判る。制約条件の克服である。コストミニマムを達成する方法とそのことによる信頼性の低下はどの程度になるのか、それらを与える学問を保全工学と呼んでも良いだろう。

2-4) [定期検査、定期安全レビュー、長期保全計画]

保全の体系化も力学のそれも多くの共通部分を持つと認識すべきである。従って、体系化されている言語学とか力学、または電磁気学などと保全の体系化は共通の方法論をもっているはずである。体系化の比較を行うことは保全体系化にとって有益である。しかし、注意しておかなければならることは、保全は物理学などの通常の学問と比較して、時間軸に関する側面をより前面に出しているということである。保全は本質的に、機器が時間経過によって引き起こされる劣化や不具合に適切に対応しようとする。

時間を陽に含むということは、構造物の挙動の未来予測を行うことが第一義的に要請されている、ということである。物理学や機械工学などではまず、現象の適切な記述（再現性があるか？）が問題となり、予測性はその次のレベルとして存在する。これに対して保全学ではシステムの挙動予測自体が学問のまず第一の対象となるのである。ここには保全学が現実の社会そのものと非常に密接に関連しているという事実が反映されている。

保全の点検周期が5年に一度であったり、10年に一度であったりする根拠は機器劣化の未来予測の精度にある。さらに言えば、[定期検査、定期安全レビュー、長期保全計画] は原子力発電設備の寿命中の経年劣化に合理的にどのように対応したらよいかを示す対策である。これらの3つの行為は時間軸に沿って実行されるものである。保全は時間による劣化を扱うので、時間を正しく分割するという認識は重要である。

3. 保全と保全学の構造

3-1) 保全の目標と制約条件

時間と空間は不思議である。両者とも目に見えない、手で触れられない、色もない、形もない。それなのに我々は時間と空間は実在していると信じている。しかし、時間は物の変化がなければ判らない。空間は物が存在しなければ判らない。劣化は時間からくる決定的な制約条件である。劣化がなければ安全問題は存在しないといってよくらいである。核燃料に放射能が存在するというのは空間的な制約条件である。財産保存的な空間的制約条件もあるが、原子力の場合、放射能の閉じ込めが主要な課題である。劣化という時間的制約条件と放射能という空間的制約条件。この2つの難題を解決することが保全の課題である。

保全の目標は、コストミニマムと信頼性マキシマムの2つである。常にこれに従わなければならない。この意味でこれは法則である。しかし両方とも閉じていない目標である。この制約条件を克服するために、技術者はこれまで経験に基づいてあるいは前例に基づいて保全行為を起こしてきた。ここに科学の目を当てようというのが保全体系化である。

しかしながら、保全の目標は閉じていない。安全性と経済性を両立させると言う保全の目標は、最良の人生が存在しないのと同じように閉じていない。閉じていない目標は原理的に達成できない。最終目標は近似的にしか満足できないことを心に留めて置くべきであろう。

3-2) 保全計画の妥当性

原子力安全が普遍性を持つとすればその根拠は無事故という実績にある。経済性を無視して、無事故だけを達成するのは困難ではない。しょっちゅう手入れしていれば無事故になるだろうからである。従って、経済性も達成されなくてはならない。両者が達成されて始めて原発に対して安心が得られる。しかし現在のところ何故無事故だったのか、その定量的な分析は容易でない。これまで安全だったから将来も安全であることを十分に証明できない。したがって原子力安全は保全によって決められると言っても過言ではない。科学的で合理的な保全の構築が望まれる所以である。そのためには保全が時空に沿って体系的に構築されていることが望まれる。そのとき保全は先駆的に普遍性を持つとしてよい。そこには

未来への外挿性が含まれていなければならない。この外挿性は今の所、実績や経験、故障率に準拠したリスク評価に基いた決定に依拠せざるを得ない。

3-3) 保全学の構造

以上議論した事に基けば、保全学の構造は図-1のようにまとめられる。ここで、図の背後に、三層の階層構造、法則-理論-規格・基準といった発展性、フランクタル構造性、が潜んでいる事に気がつくことは重要である。ここに、保全方程式やリスク評価や 3×3 マトリックスなどが出てくる。結局、保全方程式から始まり信頼性評価までの9項目が保全工学の実体を表現する事になろう。この9項目が保全ラング（保全制度）の骨格を現していることに気がつくことは重要である。保全パロール（保全行為）は中ほどの保全計画立案のところで策定される。このとき 3×3 マトリックスが有用であることは次に述べる。

3-4) 保全ラングの構築 - 時空に沿った行為の分類・分割

保全のラングを構築していく場合、準拠すべき事実や考慮すべき視点がある。それらはこれまでの保全行為のなかで前提とされている、1) 経験や運用、2) 事物の普遍的な推移あるいは、3) 事故・トラブル発生のメカニズム、などである。これらの事柄に整合し、共通する考え方を抽出し規則あるいはルールとして構築することが重要である。

保全行為のラング（規則、ルール）は、時間軸は計画-実行-評価とし、空間軸は 対象-分析-基準とする。それをマトリックスにすれば表-1のようにな

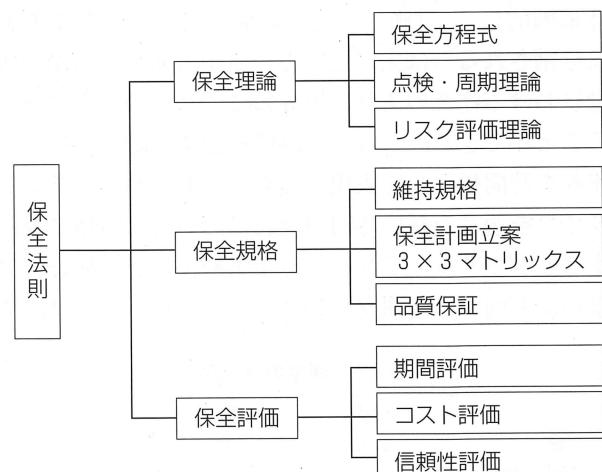


図-1 保全学の構造

る。以下これを「保全のラング」と呼ぶ。時間軸と空間軸がそれぞれ三層の階層構造を形成しているから、保全ラングを時空の完結性ということにする。これは後に説明される。プラントの設計・製作・運転管理は行為を時間軸に沿って分割したものである。このような行為は一般的に妥当であり、保全に適用すれば、[計画、実行、評価] という時間分割になる。このとき実行と評価を結ぶ階層原理が十分に開発されていないことに気がつく。例えば機器を点検した時あるいは取り替えた時、炉心損傷確率がどの程度変化したか、それを精度良く評価する技術が十分に開発されていないのである。これは、図-1 のリスク評価に相当する。

また、保全は機器の劣化に対処するため点検を行うが、この「点検」という行為は点検結果の「評価」に続きさらに評価の結果を踏まえた「保全措置」につながっていく。この [点検、評価、措置] は三層の階層構造を持ち、有効な劣化対策となっている。これが時間軸に沿った分割であるのは自明である。結局、保全の時間分割は、A = [点検、評価、措置]、B = [機器と保全作業、費用、損傷確率]、C = [定期検査、定期安全レビュー、長期保全計画] のようになる。ここで、A は保全の「設計・計画」に、B は実行結果の「評価」に、C は評価結果に基づく「措置」に対応していることが理解されるだろうか。つまり [A, B, C] もまた三層の階層構造をなしているのである。このように保全は自己相似的な三層の階層構造が連なるフラクタル構造をしていると考えられるのである。以上は階層構造を追及することで、保全の構造が明らかになる例である。

表-1 に示すように、保全活動の実施サイクルは、時系列的に、[計画、実行、評価] の 3 つの基本要素に分割されるのは先に述べた。原子力発電所の保全活動における作業の流れは単純にこの 3 つの要素に分けることができる。これは、時間を強く意識し、作業の流れを時間軸として表現したものであるが、プラントライフを通じた長い時間の流れにおいても同様に表わすことができる。それは、毎年実施する定期検査、10 年毎に実施する定期安全レビュー、それらの結果に基

表-1 保全のラング

	計画	実行	評価
対象	A1	A2	A3
分析(関係)	B1	B2	B3
基準	C1	C2	C3

表-2 保全のラング

	計画	実行	評価
対象	保全対象の明確化 保全対象の選択 例：原子力プラント、 系統（システム） 機器 部品 末端部品	保全の行為の対象の 明確化 保全対象の選択 例：点検 監視 予防保全 補修 取替	保全対象に保全行為 を行った結果 例：点検の結果 監視の結果 などにわかるか 保全の結果、対象 物はどうなる 補修、取替の結果、 どうなる
分析 (関係)	系統、機器、部品間で の機能相関の明確化 例：機能展開 健全性展開 それぞれの相関	保全行為の関係を明 確にする 例：点検項目間 点検、監視、保全 補修、交換の関連	結果の関係を明確化 例：点検、監視結果と 保全、補修、交換 の関係
基準 (抽象)	機能の判断基準の設定 例：機能仕様 規格、基準	各行為の判断基準 例：検査基準など	機能基準、規格などと 比較して結果はどうな るか 必要とする基準を満足 している 例：機能、健全性展開 を再度組み立てて 全体としての判定 基準に対する評価 を行う。

づき実施する長期保全計画の三者であり、[定期検査、定期安全レビュー、長期保全計画] のように表現できる。原子力発電所の定期点検を中心とする保全活動も基本的にはこのサイクルの繰り返しであり、プラントの設計から、建設、試運転、各サイクルの運転、廃炉、再生のプラントライフそのものも大きくはこの流れの中に位置づけられると言える。すなわち、これらの横の 3 要素は時間の流れの中で繰り返され、ある時の評価結果は次の計画に反映され、時間を経ながら変遷する螺旋の繰り返しとも言えるのである。

ここで、実際の保全活動を分類して表-2 に示すように、3×3 のマトリックスをくまなく埋めることができる。[計画、実行、評価] の時間軸に沿った各要素に対応するものとして、空間軸に沿って [対象、分析、基準] の要素を考える。このように定義された3×3の要素で出来たマトリックスによって保全活動の体系化の一部を構成することができる。それぞれの要素に対して 1 つの解釈を試みると次のように。

対象とはオブジェクトと言われる。そこには単純な意味が存在するだけである。マトリックス中の対象を示す行は、物である装置、機器、部品であったり、行為である検査、補修などであったり、あるいはそれらの評価結果で構成される。分析とは、2つの物の関係、2つの行為の関係、2つの結果の関係を示している。点検する人とされる物との関係である。また、基準とは、集約された経験や論理的な解明の結果、一般化されたり抽象化されたりして得られた判断基準であり、機器などに対して設計条件を決める基準、例えば

耐震基準や強度基準などであり、行為に対しては溶接基準や測定の判断値などがあり、評価に対しては劣化、損傷の基準が当てはまると考えられる。

表-2 の 3×3 のマトリックスにおいて各要素の内容は表-1 の各要素に対応しており以下のようなものと考える。

- ・ A1では保全対象が規定される。その対象は規模の大きさの順に原子力プラント、系統（システム）、機器、部品となっており、階層性を持たせることが肝心である。
- ・ B1では保全の対象、すなわち、系統、機器、部品間に存在する機能の維持が関心の的である。機能展開、健全性展開に沿ってそれぞれの相関性などが規定される。
- ・ C1は機能仕様や規格基準などに基づいた機能の判断基準や劣化の進展などに関する実験則などが設定される。
- ・ A2には、点検、監視、予防保全、補修、取替などの保全の行為が規定される。
- ・ B2では保全行為の関係を表わす。
- ・ C2は点検基準などの保全の各行為の判断基準を設定する。
- ・ A3は保全対象に保全行為を行った結果である。
- ・ B3では保全の結果の関係を表わす。
- ・ C3では機能基準、規格などと比較して結果がどうなるか評価する。その評価結果に基づき機能、健全性展開を再度組み立てて全体としての判断基準に対する評価を行う。

3-5) 保全ランクの合理性

保全行為には三つの主要な要素がある。それは目標とする保全の総合計画、 3×3 のマトリックス、採用すべき工学理論である。工学理論はそもそも保全とは無関係にどこにでも存在しいつでも利用できる、空間軸に沿った拡がりなのである。工学理論を保全の方へ引き寄せるすれば、例えば、点検周期を決める理論を構築することになる。保全の総合計画は基本的には時間に沿った流れであるが、これを作成するには普通ならば工学理論を頭に描きながら時間軸に沿って保全の具体的な内容を決めていくことになる。これはこれまでの技術者の潜在知に依拠した経験に基づく保全計画に他ならない。ここを科学的にする必要があるが、その役割を果たすのが 3×3 マトリックスなのである。

つまり 3×3 マトリックスは保全の総合計画と工学理論の間を埋める役割を担っており、もし立案した保全の総合計画が不完全なら、 3×3 マトリックス中にブランクが生じたり、マトリックス中の上下左右に位置する検討事項の間に合理的な整合性が無いことに気付かせてくれたりするのである。この結果、完成度の高い保全計画が実現することは想像に難くない。

従って、次のように言うことができる。保全の流れでそれぞれの実施項目の組合せや選択を評価するのに「保全ランク」と呼ばれるマトリックスを用いると、保全作業の最適化の評価が効果的にできるものと期待される。保全の流れは、まず各機器に対し満足すべき機能に対し、劣化、損傷モードの特性が明らかにされ、劣化に対する評価基準に対して、補修時期、方法、交換時期などが明らかにされる。処置後の状況が把握され、劣化、性能特性での位置づけの改善が評価され、今後の管理データが更新されることになる。

4. 保全工学の今後の展開

保全の体系化は理念的なものだけでなく豊富な実例を伴っていることが望まれる。そのためには、伝統的な学術に立脚しながらもそこから脱却し、古い工学現象を新しい学術分野として展開していくことが期待される。それらは、プラント特性の解明を可能にする仮想システム工学、安全裕度の最適分配を可能にし経済性の向上に繋がる規格工学、事故防止のための検査システム工学、事故発生予測のための事故工学、効率的な原因究明を可能とする事故事象分析学、などである。これらは従来からすでに認識されてきた重要な課題であるが、ここに定量性と予測性を導入することで新しい学術分野として発展させていくことが望まれる。

保全を体系化して縦に深め、関連学術の近代化によって横に広める事はこれまででも重要課題として認識されてきた。それにも拘らず、本質的なところは何も解決されていない、というべきである。保全のような科学的な定量性だけでは十分に記述できない分野の体系化は新しい視点を要求している。保全の体系化には数学のように全てを定量的に把握するといった側面は少ないので、言語のように定性的であっても豊かな創造ができればよい、という視点に立つことも重要であろう。

(平成15年 6月5日)