

福島事故の教訓と運転プラントのシステム安全

Lessons & Learns from Fukushima Daiichi Accident and New Concept of System Safety on Nuclear Power Plants

法政大学	宮野 廣	Hiroshi MIYANO	Member
東京大学	関村 直人	Naoto SEKIMURA	Member
東京大学	出町 和之	Kazuyuki DEMACHI	Member
日本原子力学会	荒井 滋喜	Shigeki ARAI	Non-Member
三菱総研	松本 昌昭	Masaaki MATSUMOTO	Non-Member

Since the Fukushima Dai-ichi accident, the importance of “system safety” has been recognized. Particularly, on the system safety assessment of plants in operation, the various degradation aspects with transition of time has been emphasized. Accordingly, functional degradation will be the assessment target, and the changes in the safety codes and the concept of safety will be dealt with, where, the reliability assessment will be made on the consolidation of important functions under a system, not on individual components.

The basic function of the system will be evaluated for each systems and subsystems on all of the plant. Reliability assessment for which damage risk of the three key factors – Shut-down capability, Core cooling capability and Boundary conditions – will be evaluated by applying the Defence -in- Depth concept.

Key Words : Nuclear Safety Assessment, Risk Awareness, Risk-Communication

1. 福島第一事故の提起したもの

これまで多くの方は、原子力災害における最大のハザードは地震によりもたらされると思っていた。2011年3月11日、我が国の観測史上最大のM9.0の東北地方太平洋沖地震が発生した。その直後には過去1000年余に亘り経験したことのない巨大な津波が東日本太平洋岸を襲い、大災害をもたらすこととなった。この地方に立地する原子力発電所についてもその多くが被災することになった。特に東京電力の福島第一原子力発電所では、6基ある原子炉の内、1-3号機で炉心損傷が発生する事態となった。地震に起因するものとは言え、地震による直接被害とは比べ物にならないほど大きな災害を津波がもたらすということを初めて経験したのである。

1.1 外的事象への対応

地震が発生し津波が襲った。原子力発電所は、停止はしたが、炉心の冷却ができなくなり、燃料は損傷し、大量の放射性物質が大気や海洋に放出される事態となってしまった—これが事実である。この事態に至ったのは残念ながら、私たち人間の英知が足りなかったからであろうか。私たち人間は、起こったことは再現もでき、容易に予測もできるが、経験のないことには簡単には「起き

る」としての対応はできないものである。

事前にはさまざまな発言や警告はあったが、感覚的な議論では、残念ながらまともな対応がなされていなかった。私たち、科学・技術に携わる人たちが、玉石混交の議論の中で、まじめな注意喚起への真摯に対応する努力をしてこなかったのではないかと反省される。

中越沖地震後の活動の中で、“津波”の研究が必要であるとか、安全評価の体系を見直さなければならないとか、多重故障を考えなければならないとか、様々な議論をしてきた。しかし、これも議論の域をでることはなかった。なぜなのだろうか？ 私たちはこのことを深く反省しなければならない。知の権威として“学会”と言う組織、学术界は、過去にさまざまな過ちを犯してきている。—有名な過ちの一例は、ガリレオ、コペルニクスの説-地動説-を当時の知の権威であった「教皇庁」が否定したことである。固定観念が形成されて、新しい概念を容認することができなかったのである。これにより多くの正しい人が魔女狩りによって処刑されてしまった。津波の予想高さについても、同じことが言える。—

今回の問題においては注意を喚起することの難しさを改めて感じるころでもある。結論を急ぐあまり、あるいは判断後の見直しが許されないことから、結果的には重要でなかったことに時間を

取られ、本質の議論の時間が取れなかったのではないか。地震の大きさをもっと大きく見積もっていたらとか、津波の予測の高さが足りなかったとか、制御のための電源が全て喪失する事態を想定すべきだった、と言った提案や議論が真摯にできる安全文化を作ることの大切さ、難しさを、今更ながら切実に思うところである。

その反省に立って、事故の調査、分析、評価を行い、今後の対応に活かしていくことが、我が国のこれからの発展に結びつくものであると考える。

1.2 事故シーケンスへの対応

原子力安全を確保する上で、深層防護の思想により、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」に対し多層の措置を講じることにより、放射性物質による災害から人間と環境を守る対応が取られている。その上で、自然災害は必ず来ることを考えると、何に注意すれば、今回の福島第一原子力発電所のような事故への展開を避けられるのか、そこに深層防護の持つ役割がある。

原子力災害を防ぐという視点から、今回の発電所の被害状況と対応状況を踏まえ、現時点で考えられる範囲で地震動と津波により事故に至るシーケンスの分析を行ってみた。

東日本に立地する原子力発電所 15 基中、運転中であった 13 基は自動停止し、炉心冷却過程に入った。その後襲った津波により 3 基が冷却機能を喪失して、炉心損傷事故となった。しかし、他の 10 基は冷温停止状態を達成した。地震及び津波による被害は発電所によって様々に異なる。

発電所の敷地高さや海水ポンプ室壁高さと到達した津波高さの相対的關係は、津波被害の範囲と程度に大きく影響し、津波が到達、冠水した範囲の電気系を中心とした設備（非常用電源、非常用海水冷却系等）機能を喪失させている。特に、同じ太平洋に面し、近接した原子力発電所である、東北電力の女川原子力発電所での被害は東京電力の福島第一原子力発電所の被害と比較すると津波高さが同じ 1.4 m を超えるものであったにもかかわらず、発電所設備は機能を確保し、正常に冷温停止に至ったことは特筆に値する。

地震が発生すると、まず交流電源の喪失が懸念される。今回の地震では、強い地震動により外部電源を喪失したプラントが多い。たとえ震源から比較的遠くても、外部電源を喪失しているプラントがある。送電鉄塔の倒壊が主な原因である。外

部電源を確保できるか否かは鉄塔および送電系の設置場所における震度と耐震設計に依存する。外部の交流電源が喪失したことが直接津波被害にどのように影響したのかについては、別途詳細な評価が必要と考える。

地震発生後、津波が来襲すると、まず取水口に設置されている設備が影響を受け、更に建屋内に津波が浸入して電源盤等の電気設備が影響を受ける。今回来襲した津波では、海水ポンプモータ等が津波の影響を受けて非常用電源の機能に支障をきたしているプラントが多い。原子炉が地震の揺れにより自動停止し、格納容器隔離弁が自動閉止すると、その後、原子炉は適切な手順により減圧、冷却され、燃料の冠水が維持されて安定的冷却が継続する停止モードに移行する。

一般論で考えるならば、原子力発電所の更に近傍の海域で M9 程度の地震が発生した場合にどのように事故が進展する可能性があるのかを今後分析する必要がある

耐震重要度分類は指針改訂により見直されたが、機器、設備の重要度の分類は、基本的には直接的な地震動により原子炉の「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」の機能の観点から、炉心の損傷を防ぐことを目標としている。

特に S クラスには、下記の機器、系統があり、基準地震動に対し安全機能が保持されることが求められる。

- ・原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系
- ・使用済燃料を貯蔵するための施設
- ・原子炉の緊急停止や停止状態を維持するための設備
- ・原子炉停止後、炉心から崩壊熱を除去するための施設
- ・放射性物質の放散を防ぐための施設
- ・原子炉冷却圧力バウンダリ破損事故後、炉心からの崩壊熱を除去するために必要な施設

これに加え、B クラスの機器、系統には、BWR のタービン建屋の機器類、配管があり、低いレベルの放射性物質を内包していることから、一般建築物や機器よりも厳しい基準が適用される。

近年原子力発電所は地震に対する「原子力安全」の確保の観点から、多くの経験を元に実力ベースでの評価、余裕の確認などが進み、加えて「残余

のリスク」と呼ばれる、基準地震動を超える地震動によって炉心損傷に至るリスクを評価し、更なるリスク低減の対応を施すことで地震安全が担保される見通しが得られるようになった。

一方、この地震安全評価にはわが国特有とも言える海岸線に沿って原子力発電所が立地されている事情から、海域での地震により発生する津波への配慮もまた必要である。しかし、これまでの原子力発電所の耐震基準においては、揺れに対するきめ細かい評価手順が基準化されているのに比べて、津波に対しての規定は不十分なものであった。

地震動による機器、構造の損傷は、確率論で扱うことが可能であり、機能を失うものも健全なものも、ハザードと脆弱性を重ね合わせることでシステムとしての健全性を評価することができる。一方、今回の津波においては、あるレベルを超えるハザードに対しては、そのハザードが及ぶ範囲の機器、構造などは全てその機能を失う、といういわゆるクリフエッジ効果が生じるため、それに対する対応が重要であることが示された。

1.3 本質的な教訓

様々な教訓が得られている。「原子力安全」を評価する点からは、以下の教訓が重要である。

- (1) 外的事象の脅威を可能性として評価すること。ハザード評価への取組である。発生事象の重量を考えることも必要である。
- (2) 設計の限界を認識すること。担保できる事象の領域を明確にし、それを越える事態を想定すること。故障、不具合の同時、一斉発生も考慮すること。
- (3) システムとして土木、建築、機械、電気など様々な技術分野で構成されるシステム、機器の連携、影響を考慮したシステム安全への取り組みが必要である。
- (4) リスクの扱いや深層防護の取り込みなどにより上記を柔軟に実現することが求められる。

2. システム安全の導入

2.1 システム安全の考え方

前回第10回の学術講演会にて報告した、「運転プラントのシステム安全評価の体系化」において、原子力発電プラントの原子力安全を確実にする方

策として、「システム安全」の概念を導入して、プラント全体を機能に着目し、各システムの関連を総合的に評価して、安全確保を図る方法に関して提案している。

その概要は、

—原子力プラントの安全に係わる主要な機能は、基本的に、a. バウンダリー機能、b. 冷却機能、c. 制御機能 である。これらの基本機能がプラントの経年とともに、主要なシステムにおいてどのように劣化したり、変化したりして、機能喪失に至るかを評価する。すなわち、劣化事象における主に材料の劣化特性と機能維持との関係でのその劣化を評価する指標を検討し、適切な「安全評価指標」としてまとめる。

原子力発電所の安全確保には、社会との関連による原子力利用の正当性（ベネフィット）の認識と相対しての深層防護による原子力リスクの低減と受容がある。そこには、システム安全における放射性物質の閉じ込め機能としてバウンダリーの維持、炉心の健全性維持に関連しての冷却性能の確保、炉停止をはじめ、各設備の稼働を支配する電源の確保を含めての制御機能の維持、というそれぞれの機能因子を互いの関連を評価しつつ、システム全体としての機能の確保、維持、管理が基本となっている。—

—というものである。

原子力発電所の設計においては当初より深層防護（Defence in Depth）の思想を取り入れている。すなわち、事故につながるような①異常の発生防止、②異常の拡大防止と事故への発展の防止、③放射性物質の異常な放出の防止であり、ここまですを深層防護のレベル1～3と呼んでいる。原子炉施設の機能から捉えると、異常あるいは事故状態に陥った場合あるいは陥る可能性がある場合には「原子炉を止める」、「原子炉を冷やす」、「放射性物質を閉じ込める」ことが原則となる。そのために必要な反応度制御、冷却設備、機器等は多重性または多様性及び独立性を持たせることにしてきた。

したがって、この能が完璧に発揮される限り原子炉は十分に冷やされ、放射性物質が外部に放出されることはなく、人及び環境を放射線の有害な影響から防護することが可能となる。つまり、原子力発電所の潜在的リスクは燃料棒内に大量の放射性物質を持つことであり、事故によりこれを封

じ込めておくことが出来なくなると、このリスクが顕在化することになる。

本報告では、事故に至る第4層5層への取り組みについて基本的な考え方を提示する。

2.2 事故時のシステム安全の導入

深層防護の第4層の設計基準を超える領域（AM）での耐性評価「システム安全」の評価手法について検討する。

このAMの領域を様々な事象に対する様々なシナリオをベースとして評価する仕組みを構築する必要がある。第4層の領域は、既に設計基準を超えた領域であるので、設計基準での耐性評価と同じ考え方では成り立たない。すなわち、この層に合った基準を置く必要があるが、深層防護の理論を検討する今後の課題として残し、ここでは以下の前提を置く。

- ① 第4層に設けられた設備は、稼働することを前提とする。
 - ② アアクシデント（SA）の要因の発生は、様々なシナリオを想定し、シナリオ毎の対応を検討する。
 - ③ SAを起こさない、防止を目的に評価する。
 - ④ SAの発生には、漏えい以外は深層防護の第5層として放出放射能の低減策を評価する。
- 従って、シナリオをどれだけ想定するか、ということによって原子力安全の確保への信頼性が高くなる。

また、機能喪失に対する復帰能力（レジリエンス）についても、訓練の実績などを考慮した耐性評価を行う必要がある。

重要なポイントの一つが、レジリエンス力（回復力）である。機能喪失への対応は、必要な時間に必要な最低限の機能を回復することが必要であり、代替機、システムによるカバー、人による代替えなどが重要な要素で、どのように評価に組み入れて行くか、ということへのチャレンジが必要である。図1には、ハザードの発生から機能の喪失・低下、復帰の時間、安全確保に必要な機能の程度との関係を表す。

4. システム安全評価法の特徴

福島第一の事故は、世界、国内外に大きな衝撃を与えてしまった。一方で、様々な教訓を得た。すなわち、

- ・原子力安全確保の仕組みを安全確保に対する保全の役割を根本から見直す必要がある。
 - ・“深層防護”の観点から、設計での考慮の範囲を拡大が必要。
- 防災までの範囲で、深層防護を適用した評価。シビアアクシデント時・事故時の機能損傷・喪失の評価も必要。
- ・システムとして総合的にまた適切に評価する手法が必要であり、“機能”の維持に焦点を合わせた評価の開発のため、その概念を構築した。

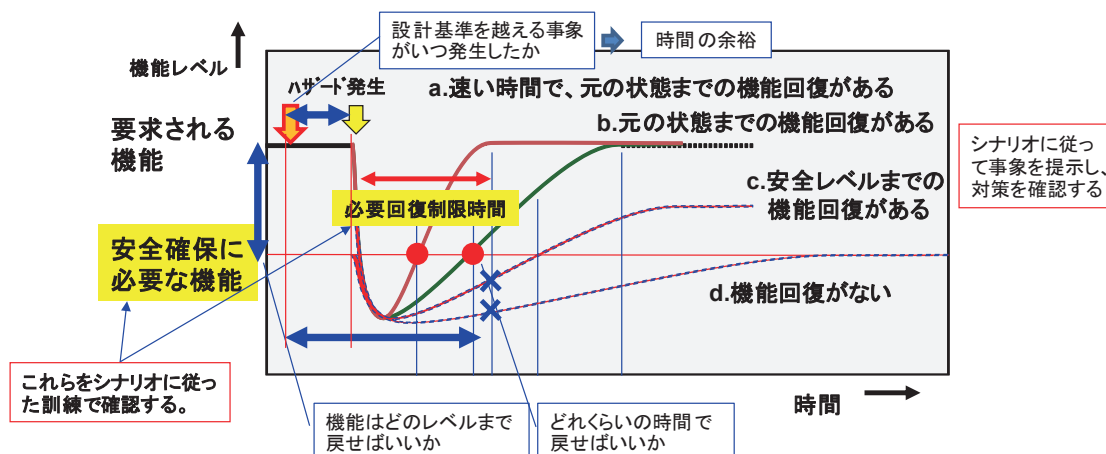


Fig.1 Concept of Resilience on Nuclear Plant System

プラントや設備により第4層での対応は異なる。津波の例でのシナリオでも、各プラントの事情により、津波ハザードの程度が異なること、設備の事情が異なり既存設備の耐性が異なること、AM策が異なることなどの考慮が必要である。

- ・安全評価基準の変化への対応が必要である。これは、新しい基準の運転プラントへの適用ーバックフィットへの適用ーが可能となる。
- ・システム・機器の劣化事象に対する機能喪失の定義を明確にすることで評価が可能となる。

- ・様々なハザード <特に外的事象>に対する健全性評価が必要である。
(わが国で厳しい環境にある、地震動に対して試評価する。)
- ・運転プラントのシステム安全評価法が構築され、客観データに基づき評価時点での安全に対するリスクとして信頼性が評価される。
- ・情報基盤、知識基盤の構築と合わせて国際社会に役立つものとする。

“システム安全の体系化と評価法の構築”において、運転プラントのシステム安全を評価する方法として、深層防護と機能維持を基盤とするシステム安全の評価体系の全貌が構築することができた。

その基盤となる「原子力安全の基本的考え方—原子力安全の目的と基本原則」を構築し、原子力安全に係り人が共有すべき原子力安全の基本的考え方が確立された。

システム安全評価法は 社会との連携からプラントへの反映まで、全体をスルーした体系となる見通しであり、深層防護の体系に則した、設計から、それを超える過酷事故を含む領域までの運転(経年)プラントの機能損傷(喪失)リスクを評価するものである。これは、運転プラントの保全(検査、監視、補修、取替、ヒューマンファクターなど)の要素を取り込んだ評価法であり、過酷事故領域(深層防護のレベル4)での、シナリオベースの評価法、レジリアンスの取り込みを提案も含まれている。このシステム安全評価法は原子力の安全確保のための規制にも活用されることが望まれる。本システムは、新知見の取り込み、成果、世界のデータの取り込み、および情報基盤と連携し活用されることが望まれる。

5. まとめ

機能劣化による運転プラントのシステム安全を評価する体系を構築した。

その特徴は、

- ・深層防護の考え方に基づく機能に着目した。
- ・運転プラントのこの評価法を適用する評価時点での機能の喪失リスク、すなわち信頼性を評価する。
- ・評価時点の最新の「原子力安全」に寄与する「安全基準」に基づく評価を行う。

- ・設計基準を越える事象の発生に対しての原子力事故に至るリスクを求める機能の喪失リスクとして評価する。
- ・保守・保全の効果を取り込んだ評価法である。

運転プラントにおける「システム安全」の評価手法として、プラント全体の安全を総合的に評価する方法を確立した。具体的には、様々な材料劣化などの機能を低下させる状態変化を系統の全てに渡り評価し、その機能低下による系統の求める機能の喪失のリスクの総和として評価することにより、システム全体として「原子力安全」の程度を把握することができる仕組みである。また、事故時の事象への対応については、想定される安全上重要な事象を選択して、シナリオを展開し、事故進展、放射性物質放出への可能性、指標が求められる。

謝辞

本研究は、原子力規制委員会・規制庁の委託プロジェクト「高経年化技術評価高度化事業(2011ー)」にて進めてきた成果である。関係各位の協力に謝意を表する。

参考文献

- [1]原子力発電所が二度と過酷事故をおこさないために ー 国、原子力界は何をなすべきか ー 原子力発電所過酷事故防止検討会報告書 平成25年4月22日、技術同友会
- [2]東京電力株式会社 福島第一原子力発電所のアクシデントマネジメント整備報告書 平成14年5月
- [3]日本保全学会 第10回学術講演会講演論文「運転プラントのシステム安全評価の体系化」、宮野ほか、平成24年7月28日
- [4]M.Takizawa, S.Takagi, H.Miyano, N.Sekimura, "Development of Technical Information Basis in Japanese Ageing Management Program for System Safety of PPs", IAEA-CN-194-1P07, 2011
- [5]H.Miyano, A.Yamaguchi, K.Demachi, M.Matsumoto: "Study of System Safety Evaluation on LTO of National Project- Basic Concept of Functional Degradation and System Safety Assessment of Nuclear Plants in Operation-", ICMST 2012 Tokyo

(平成24年6月20日)