

原子力安全とリスク認識

Nuclear Safety Assessment of Nuclear Operating Plants after Fukushima No.1 NPS Tsunami Accident

法政大学	宮野 廣	Hiroshi MIYANO	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

In view of the severe consequences of TEPCO's Fukushima Dai-ichi NPP accident, a new framework for the continuous enhancement of severe accident management (for beyond design basis accidents involving significant fuel damage) should be established for the operation of existing plants in Japan. Preparedness and response measures for addressing extreme natural disasters as large-scale earthquakes and tsunamis, and for other severe accident initiators should be formulated quickly, properly, and in good sequence, with account taken on design and siting conditions, etc., of each plant.

No measure in any industry will warrant 100% safety regardless of the completeness of the measure, always associated with some risk or uncertainties. The measures are developed for the purpose of minimizing the level of risk. This should be communicated to the public in gaining understanding and establishing consensus on the benefit of nuclear power generation.

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

1. 原発電所の潜在的リスクは何か

原子力利用における基本的安全の目的は、人及び環境を放射線の有害な影響から防護することである。原子力発電では、ウランまたはプルトニウムの核分裂によって生じるエネルギーを利用して発電を行っている。原子力発電の根源的なリスク要因は核分裂反応に伴って発生する核分裂生成物に由来する。核分裂生成物の約90%は放射性物質であり、核分裂反応を止めても放射性核種それぞれの半減期に応じて崩壊する際に熱（崩壊熱と言う）を発生し、この熱を十分に除去出来なければ、核燃料とともに核分裂生成物を閉じ込めている金属製の被覆管が破損し、最悪な場合には、環境に放射性物質、すなわち放射能を放出することになる。崩壊熱量は時間とともに減衰するが、原子炉を止めた直後では、定格熱出力量の約7.5%、すなわち電気出力100万kWの場合では熱効率約34%であるので22万kWの熱量が放出され、1時間後には約1%、100日後には約0.1%に減衰する。しかし、いずれにしてもある一定期間原子炉（燃料棒）を冷やし続ける必要がある。また、万一、燃料棒が破損して放射性物質が放出されたとしても外部に放出されないように閉じ込めることが求められる。

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、ここまですなわち深層防護のレベル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してきた。また、放射性物質の放出抑制・防止については、ウラン燃料をセラミック状に焼き固めたペレットとし、これを金属製の被覆管で密封し、さらに、燃料棒の存在する原子炉は压力容器に収めて、その上、压力容器及び1次冷却系配管系統を気密性の高い格納容器内に配置して多重障壁を設けて管理している。

したがって、上記の機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。

2. リスクコミュニケーションの基盤構築

2.1 リスクコミュニケーションの重要性

「安全神話」への戒めは、JCO 事故の反省としてすでに平成 12 年の原子力安全白書において指摘されている。

「多くの原子力関係者が「原子力は絶対に安全」などという考えを実際には有していないにもかかわらず、こうした誤った「安全神話」がなぜ作られたのだろうか。その理由としては以下のような要因が考えられる。

- ・原子力以外の分野に比べて高い安全性を求める圧力容器、格納容器など原子力の重要施設の設計などへの過剰な信頼
- ・長期間にわたり人命に関わる事故が発生しなかった安全の実績に対する過信
- ・過去の事故経験の風化
- ・原子力施設立地促進のための PA（パブリック・アクセプタンス＝公衆による受容）活動のわかりやすさの追求
- ・絶対的安全への願望

こうした事情を背景として、いつしか原子力安全が日常の努力の結果として確保されるという単純ではあるが重要な本質が忘れられ、「原子力は安全なものである」という PA のための広報活動に使われるキャッチフレーズだけが人々に認識されていたのではないかと推察されている。

こうした状況は、関係者の日常的な努力によって安全確保のレベルの維持・向上を図るという、「安全文化」に著しく反するものである。過去の事故・故障は、いわゆる人的要因によって多く起きており、原子力関係者は、常に原子力の持つリスクを改めて直視し、そのリスクを明らかにして、そのリスクを合理的に到達可能な限り低減するという安全確保の努力を続けていく必要がある。」

このように、白書では既に「安全神話」に対する問題が指摘されていたのである。JCO 事故時には、人的因子（組織因子）の考慮に不足があったことが認識されたわけであるが、今回は、自然災害の考慮にも不足があったことが露呈された。

東電福島第一原子力発電所事故に関する各種調査報告では、より明確な形で安全神話の悪影響が

指摘されている。東京電力による報告書（「福島原子力事故の総括および原子力安全改革プラン」）においては、特に、「リスクの存在を認めると追加対策なしには運転継続することができなくなるとの思いから、リスクコミュニケーションを躊躇し、十分安全であると思いたいとの願望を生み、それが安全は既に確立されたものとの思い込みを助長した」と分析している。

安全神話は、安全にとって極めて有害なものである。

安全神話からの脱却には、リスクの存在を認め、それに真摯に取り組む状況を示すことによって原子力安全への国民の理解を得ること、すなわち、誠実なリスクコミュニケーションの努力が必要である。しかしながら、国民の理解を得るには、存在するリスクの説明だけでは不十分であり、そのリスクそのものの認識を共有し、その上でそのリスクが受容可能なレベルにあること、そのレベルがどのように評価、検証されているのか、といった科学的な論拠が示される必要がある。さらに、このプロセスにおいては、現在の安全性の状況を検証し、弱点を認識し改善するという継続的な安全向上努力そのものと密接に結びついており、これを公開し、努力している状態と合わせて進展が見える努力をすることと、丁寧に対話することがリスクコミュニケーションを成功させることにつながるものとする。

2.2 リスクを受容できる条件に関する議論

原子力発電には、他の電源と比較して様々な利点がある一方、ウランまたはプルトニウムの原子核の核分裂に伴って放射性の核分裂生成物が発生する。この核分裂生成物は、その崩壊に伴い熱を発生するので、原子炉を停止しても除熱する必要があり、また、放射性物質は閉じ込めておかなければならない。今回の東電福島第一原子力発電所事故においては、この機能を維持できず、近隣住民をはじめ国民に多大な迷惑と損害等をもたらした。このリスクを最小化しなければならないが、それは、どこまで低減すれば安全といえるのだろうか？これは、”How safe is safe enough?” の問題として、リスク問題として多くの国で確率的な数値の形で安全目標が定められ、決定論的な規則を補う形で活用されつつある。我が国でも、原子力安全委員会で議論がなされ、安全目標案が提案されていたが、ようやく、原子力規制委員会から明確に安全目標が提示された。

今回の事故を踏まえ、放射性物質の環境への放出を制限することが提言されている。安全目標案においては、指標として人の死亡のリスクを用いてきたが、被ばくによる生命及び健康への影響は、避難等の防護対策により大幅に低減できることは東電福島第一原子力発電所事故において公衆への明確な放射線影響が見られていないことから明らかである。一方で、広域の環境汚染は、長期にわたり周辺住民の生活基盤を奪い、多大な損害を与えている。除染費用も国民に重い負担を強いることとなる。このことから、安全目標には大規模な環境汚染に係わる指標と、その許容または容認頻度を加えることを検討する必要がある。

原子力規制委員会は、環境への影響を目標値として与えること-セシウム (Cs^{137}) で100テラベクレル ($10^{14}Bq$) 相当とし、その頻度の抑制の目標値を 10^{-6} /炉年-を提案した。CRF (炉心損傷確率) の意味を分かりやすく言うならば、我が国に多い110万キロワット級の軽水炉では、土地汚染をもたらす代表的な元素であるセシウム (Cs^{137}) (半減期は約30年) を例とすれば、通常運転時のセシウムの原子炉内内蔵量 (およそ 2×10^{17} ベクレル (Bq)) に対して放出される量の割合を800分の1 (排気筒放出) から4500分の1 (地上放出) 程度の放出にとどめることを意味している。東電福島第一原子力発電所での放出量は現段階では $6 \times 10^{15} \sim 15 \times 10^{15}$ ベクレル (Bq) と推定されており、この量に比べれば、100分の1程度のオーダーに抑制することになる。

具体的に、この要求を満足するには、格納容器の健全性を維持するか、またはそれができない時には高性能のフィルターを通して放出するようにシステム設計を強化することも必要となる。諸外国での環境汚染を考慮した安全目標の例としては、イギリスやフィンランドでは、大規模な環境汚染のリスクを制限することを目的として、大規模放出を定義する放射性物質の格納容器からの放出量を定め、その発生頻度の目標値を示している。フィンランドの場合でも、大規模放出の定義をセシウムで100テラベクレル、 5×10^{-7} /炉年としている。原子力規制委員会が提示した CFF-2 の管理放出機能喪失頻度の目標値は、この放出量の制限値とも参考比較される。

性能目標は、安全目標への適合性確認が行いやすいように、安全目標に適合していることを判断できる目安を施設の特性に関する指標で表現した

ものである。内的小および外的起因事象の全体を含めた事故シナリオについて、炉心損傷頻度 (CDF) 10^{-4} /炉・年、格納容器破損頻度 (CFF) 10^{-5} /炉・年程度を性能目標としている。

2.3 安全目標に関してさらに検討すべき課題

リスクの目標を具体的な数値で定量的に示すことの最大の利点は、合理的でバランスの良い安全確保の努力を可能とすることと、その努力を科学的根拠とともに国民に示すことができる点にある。従って、科学的な評価及び検証ができないほどの低い数値を掲げることには疑問がある。現在及び近い将来の科学技術の水準に照らして合理的に適用可能な目標を提案し、合意形成を目指すべきである。

安全目標の設定については、このように検討すべき課題は存在するが、課題に対応する改良も加えつつ、国民に認知され合意が得られるリスクとはどのようなものであるかについて国民との対話を行い、多くの国民の納得を得ることのできる安全目標を設定し活用を図ることが、極めて重要である。

安全目標や性能目標が意味を持つためには、リスクを評価する確率的リスク評価 (PRA) の考慮の限界や不確実さを含めて、結果の意味が十分に説明されていることが前提である。国民にリスクを説明する際には、考慮範囲を明示し、範囲外のリスク要因について評価する方針を示すことや、残るリスクをどのように考えたかを説明すること、さらに評価手法の不確実さが大きいために安全目標を満足できているかの判断がしにくいような場合には、合理的に考えて実行可能な努力がどこまでなされているのか、といった情報を提供することが重要であり、それ無しにリスク受容の議論は成立しえないと考えるべきであろう。

3. 深層防護 (Defence-in-Depth) の考え方

「原子力安全」の確保には、「原子力事故、放射線事故の発生防止及び影響緩和のために、実行可能なあらゆる努力を払わなければならない。そのために、「深層防護」の考え方が取り入れられた。これは、事故の発生防止と影響緩和の主要な手段として位置づけられ、基本的には「事故を起こさない」、「起こしても拡大させない」、「起きたとしても公衆に被害を及ぼさない」ための考え方であり、我が国では、「多重防護」とも呼び、従来、原子炉施設の場合には、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、の3段階で対応してきた。

更に、この概念を展開して、シビアアクシデント（過酷事故）への対応においても、積極的に適用して行かなければならない。この概念は、様々なフェーズ（展開）において、多重、多様、独立の防護策を講じることである。特に、炉心に大量の放射性物質を内蔵している原子力発電所のような、人と環境に対して大きな放射線リスクが内在するものにおける様々なハザードに対しては、その影響、リスクの顕現化を徹底的に防ぐことが必要となり、そのため原子力の分野においては、人と環境を護るためにこの概念に沿って積極的な防護策（戦略）を講じる必要がある。

人と環境を防護するにあたって、ある一つの対策が完璧に機能するのであれば、対策はそれだけで十分なはずである。しかし、放射線や放射性物質が制御されずに環境中に放出される原因から、それらが人と環境に影響を与えるまでの諸所の現象には人智が及ばない振る舞いが存在する。また、一般に対策は、ある想定に基づいてとられるため、その想定から除外した事項や人智が及ばない事項が存在する。すなわち、人と環境に影響を与えるまでの諸現象や対策の効果には不確実さが存在する。したがって、一つの対策は、ある非信頼度（unreliability）を有するということになり、完璧な対策とはなり得ない。

一方、人と環境に対する危険性の顕在化を徹底的に防ぐ必要があることから、一つの対策では防げない不確実な事柄に対して、別の対策により防護策全体の信頼性を高めることが必要となる。このように、一つの対策では防げない不確実な事柄を考慮して、人と環境に対する防護策全体の信頼性を高めるために適用されるのが「深層防護」の考え方である。

4. リスク評価の活用

原子力施設の安全確保には想定外は許されない。原子力安全を脅かす事故を防ぐには、リスク評価を基にした徹底した自然災害、人為的事象及び内部事象等による事故事象の想定と対策を検討すべきであり、またそれを達成する仕組みを構築しなければならない。東電福島第一原子力発電所事故の教訓を反映した徹底的な見直しを行い、深層防護を基本としたアクシデントマネジメントや防災

対策の充実に努めるとともに、その対策がなされた後も継続的に新たな知見・研究成果の分析を行って重要な知見を見分け、反映する仕組みを含むものとすべきである。

リスク評価の基本は、発生確率の評価、PRA（Probabilistic Risk Assessment）であり、施設で起こりうる事故シナリオを系統的に洗い出し、その発生頻度と影響の大きさを評価することで施設の安全を公衆へのリスクとして表現する安全評価の方法が有効である。

定量的なリスク評価の一つとしてのPRAにより、経験していない事象であっても考慮に含めつつ、リスクの観点から重要な事故シナリオを見つけ出すことができるので、安全対策における相対的な弱点を明らかにし、対策を強化することができる。これがPRAの最も基本的な使い方であり、原子力安全の評価においてPRAが重要である理由である。

リスク認識は、個人で大きく異なる。多くは、リスクではなく、その影響を指すことが多い。放射性物質の漏れることや、炉心損傷、などである。尺度が共通ではなく、受け取る感覚、認識でその程度は大きく異なる。そこで、これらの認識の共通化が必要である。

さらに、防災計画については、今回の事故の教訓として平常時から具体的な過酷事故のシナリオを想定した計画の整備・強化が重要であることが指摘されているが、このためには広範なシナリオの発生可能性を考慮して有効な防護対策を検討しておくことが必要である。リスクコミュニケーションで認識の共通化が必要である。

参考文献

- [1] SF-1, Fundamental Safety Principles, IAEA, 2006
- [2] 「原子力発電所の地震安全に関する検討報告書 “地震安全ロードマップ”」日本原子力学会原子力発電所地震安全特別専門委員会編、2011年9月発行
- [3] 「原子力安全の基本的考え方について第I編-原子力安全の目的と基本原則」AESJ-SC-TR005:2012 二本原子力学会標準委員会技術レポート2013年6月発行
- [4] 「原子力発電所が二度と過酷事故をおこさないために 一国、原子力界は何をなすべきか」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
- [5] 「高経年化技術評価高度化事業(2013年度報告書) 原子力規制委員会・規制庁 平成26年3月発行 (平成24年6月20)