

原子力分野におけるリスク評価の適用状況

澤田 健一、小田野 直光

Application of Risk Analysis in Nuclear Fuel Cycle

by

Ken-ichi Sawada and Naoteru Odano

1. まえがき

昭和41年に、茨城県東海村において国内初の商業用原子力発電所（日本原子力発電（株）東海発電所）が運転を開始してから40年以上が経過し、国内で運転中の原子力発電所は55基を数える。現在の、国内の電力消費量に占める原子力発電の割合は約31%である。平成20年5月発表の経済産業省総合資源エネルギー調査会の報告¹⁾によれば、将来的な国内電力需要は、現状の省エネルギー対策技術が継続されれば、総人口の減少と共に2020年をピークに下降傾向に転ずると予想されている。しかしながら、京都議定書に基づく二酸化炭素排出量抑制対策として、電力消費量に占める原子力発電の割合は現状より高い40%程度まで上げることとなっている。このため、現在建設計画中のものも含めて9基の新規原子力発電所が、現在運転中の原子力発電所基数に加えて建設される計画となっている。このことから、将来的にも我が国のエネルギー分野における原子力の重要性は高く、その安全性を一層明確にすることが求められることとなる。

我が国の原子力政策においては、核燃料サイクルを確立することが決められている²⁾。核燃料サイクルは、原料ウランの確保、転換、ウラン濃縮、再転換、核燃料の加工から始まり、利用後の放射性廃棄物の処理・処分、使用済燃料の中間貯蔵、使用済燃

料再処理及びウラン、プルトニウム等の有効資源の再利用といった一連の閉じたサイクルで構成される。この核燃料サイクルは、原子力発電所や処分施設等に代表される固定施設における活動と、各固定施設間をつなぐ放射性物質輸送活動から成り立っている。

本報告では、原子力関連の固定施設分野及び放射性物質輸送分野における安全性評価に対するリスク評価手法の適用状況に関して報告する。

2. 固定施設におけるリスク評価の現状

2.1 原子力発電所の現状

原子力発電所においては、1979年の米国スリーマイル・アイランド原子力発電所2号機及び1986年の旧ソ連チェルノブイリ原子力発電所4号機の事故を受けて、炉心の重大な損傷に至るシビアアクシデント（過酷事故）の発生防止と影響緩和の方策（アクシデントマネジメント）のために、早期よりリスクを定量的に算定する確率論的安全評価（PSA：Probabilistic Safety Assessment）の研究が国際的に行われてきた。PSAは、機器の故障や外的事象など事故の発端となる事象の発生頻度と、その後の安全系の故障などの影響を確率論に基づき定量的に評価することにより、原子力施設の安

全性を総合的に評価するリスク評価手法である。原子力発電所の PSA は 3 つのレベルに区分され、レベル 1 PSA では、炉心損傷の発生確率、レベル 2 PSA では、炉心から環境に放射性物質が放出される事象の発生確率と放出放射エネルギー、レベル 3 PSA では、環境に放出された放射性物質が周辺公衆に及ぼす健康障害（個人の平均死亡リスク）の定量的な評価が行われる。

これら安全研究の成果を参考として、我が国では平成 4 年 5 月に原子力安全委員会によって、原子力発電所のシビアアクシデントの発生防止と影響緩和に係るアクシデントマネジメントの整備を奨励する決定が行われた³⁾。この決定を受けて、通商産業省（現経済産業省）により各電気事業者に対してアクシデントマネジメントを整備する旨の要請がなされたことにより、事業者自身による稼働中の代表的な原子力発電所へのアクシデントマネジメントとしての PSA の自主的な適用が進展した。また、原子力発電所の安全性、信頼性について、約 10 年毎に総合的な評価を行う定期安全レビュー（PSR：Periodic Safety Review）が実施され、運転経験の包括的な評価、最新の技術的知見の反映及び PSA の結果について評価がなされてきた。

続いて、原子力安全委員会は、平成 12 年 1 月に PSA 技術の向上や諸外国におけるリスク情報（リスク評価結果そのもの、及び系統、機器等のリスクに対する寄与に係る情報等）の安全規制への活用への進展に基づいたリスク許容範囲を示す安全目標策定の必要性を打ち出し⁴⁾、同年 9 月には公衆に放射線被ばくによる悪影響を及ぼす可能性のある原子力活動全般を対象とした PSA のための安全目標策定に向け、多様な視点から総合的な調査審議を行うことを目的とした安全目標専門部会を設置した。同専門部会は、平成 18 年 3 月に「発電用軽水型原子炉施設の性能目標について－安全目標案に対応する性能指標について－」⁵⁾を作成し、具体的な安全目標案の提示を行っている。安全目標は、安全の水準を示す上で、客観的で、健康被害を生じる可能性が完全には否定できない様々な活動に伴うリスクに共通するものであることが望ましいことから、公衆の個人リスクを指標として用いることとされている。安全目標は、性能目標としての定性的目標と定量的目標から構成される。定性的目標案では、「原子力利用活動に伴って放射線の放射や原子力施設から放出される放射性物質の放散により公衆の健康被害が発生する可能性は、公衆の日常生活に伴う健康リスクを有意には増加させない水準に抑制されるべきである」との提示がなされている。一方、定量的目標案においては、「原子力施設の事故に起因する放射線被ばくによる、施設の敷地境界付近の公衆の個人の平均急性死

亡リスクは、年あたり百万分の 1 程度を超えないように抑制されるべきである。また、原子力施設の事故に起因する放射線被ばくによって生じ得るがんによる、施設からある距離にある公衆の個人の平均死亡リスクは、年あたり百万分の 1 程度を超えないように抑制されるべきである」（図 1 参照）として、この条件を満たすために以下の二つの定量的な指標を提示している。一つはリスクの源となる炉心に内蔵される放射性物質の放出をもたらす炉心損傷の発生確率、すなわち炉心損傷頻度（CDF: Core Damage Frequency）であり、二つめは、原子炉格納容器等の発電炉の最外層の防護機能が確保されていれば、環境への放射性物質の放出を極めて低いレベルに抑制することが可能であるとの観点から、格納容器の防護機能喪失の年当たりの発生確率である格納容器機能喪失頻度（CFF: Containment Failure Frequency）である。また、各々の指標値として以下の定量値が提示されている。

- ・ CDF： 10^{-4} ／炉・年程度
- ・ CFF： 10^{-5} ／炉・年程度

性能目標の適用条件としては、PSA の不確実性を考慮した上で、上記の指標値を同時に満足することを条件としている。本指標値の導出においては、我が国において得られた知見および米国等における PSA 結果等を参考にした評価がなされており、その保守性が確認されている。なお、意図的な妨害破壊行為等に起因するリスクの抑制は、安全対策としてよりは、保安対策として検討すべき事項として検討対象外とされているが、平成 20 年 12 月には米国原子力規制委員会（NRC）によって米国内の原子力発電所におけるセキュリティ規則を強化するための規則案が承認されたこともあり、今後の我が国での動向も注目される場所である。

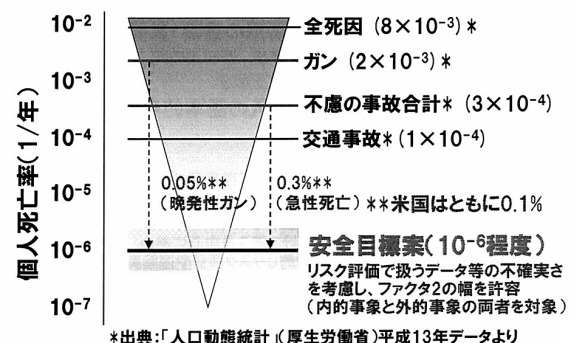


図-1 安全指標案（定量的指標）⁶⁾

また、原子力安全委員会は、平成14年の電力事業者による自主点検の不正問題が明らかになったことを受け、「リスク・インフォームド型規制（RIR:: Risk Informed Regulation）」の導入について検討を開始することとし、平成15年11月には、安全規制の合理性、整合性、透明性の向上及び安全規制活動のための資源の適正配分の観点から、リスク情報活用の意義を確認し、今後、我が国にリスク情報を活用した規制を導入していくに当たっての基本的な方針を提示した「リスク情報を活用した原子力安全規制の導入の基本方針について」⁷⁾（以下、「基本方針」）を決定した。基本方針においては、安全規制におけるリスク情報活用の意義及び重要性として、

- ・安全規制の合理性・整合性・透明性の向上
- ・安全規制活動のための資源の適正配分

を挙げており、これを達成するためにリスク情報の補完的導入及び段階的導入を示している。補完的導入では、多重防護の考え方を基本的に堅持しつつ、従来の工学的判断や決定論的評価に基づく規制を、定量的・確率論的な評価により得られるリスク情報を活用することによって補完するとしており、一方、段階的導入では、当面、現行の安全水準の維持向上を図りつつ、相対的なリスク評価や運転実績等によるリスク情報を活用することとしている。相対的なリスク評価の例としては、系統・機器等の保守・検査を行うに当たって、リスク情報を活用し、従来は工学的な判断によっていた系統・機器等の重要度に、リスクへの相対的な寄与度を考慮することなどが示されている。将来的には、安全目標を考慮に入れて、多重防護の考え方を適用する際の保守性にリスク情報を考慮するなどにより、設計、建設段階を含めた安全確保体制全体として、リスク情報を活用した規制の導入を体系的に検討していくことが目標になるとされている。

このような基本方針の下に、原子力安全委員会は、平成16年4月に我が国にリスク情報を活用した規制を導入するに際してイニシアティブを発揮するとともに、全体に整合の取れた進捗が図られるように今後の課題と方向性に対して提言を行うこと等を目的として、「リスク情報を活用した安全規制の導入に関するタスクフォース」を設置した（図2参照）。平成19年には、図2に示す各機関の役割及び課題に関して取りまとめを行った「リスク情報を活用した安全規制の導入に関する関係機関の取組みと今後の課題と方向性—リスク情報のより一層の活用と進展に向けて—」を作成した。上記の基本方針に則った規制動向として、平成21年1月には各原子力発電所の設計や特性に応じたよりきめ細やかな検査が可能となるように、リスク情報に基づく検証も踏まえた新しい検査制度がスタートしたところである。

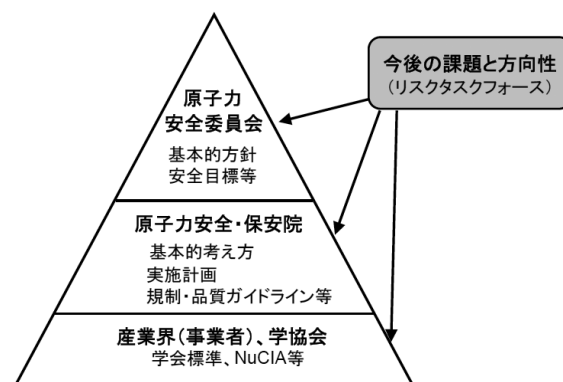


図-2 タスクフォースの概要⁸⁾

耐震設計に関しては、平成18年9月に耐震設計審査指針が改訂され「残余のリスク（想定を上回る地震動により、施設の重大な損傷事象、大量の放射性物質が放散する事象、又はその結果として周辺公衆に対して放射線被ばくによる災害を及ぼす事象のリスク）」を安全審査の際に参照するなど、将来のRIRの導入検討に役立つ情報を可能な限り活用することとされたが、平成19年7月に発生した新潟中越沖地震が東京電力柏崎刈羽原子力発電所へ及ぼした影響によって、耐震設計審査指針の再度の見直しが求められているところである。

また、昭和41年に国内初の商業用運転を開始した東海発電所は、現在、国内初の廃止措置が行われているが、廃止措置に伴う施設解体によって発生する廃棄物区分にもリスクの概念が適用されている。原子力発電所の解体に伴って発生する廃棄物は、以下の3つに分類される。

1. 放射性廃棄物でない廃棄物
2. クリアランス制度対象廃棄物
3. 低レベル放射性廃棄物

附属建屋などの建築部材として使用されていたコンクリートのように全く放射性廃棄物でない廃棄物は、通常の産業廃棄物と同様の扱いによって解体・処分される。クリアランス制度対象廃棄物とは、放射性物質として取り扱う必要のない放射能レベルの廃棄物のことである。この放射能レベルは、「自然界の放射線レベルに比較して十分小さく、また、人の健康に対するリスクが無視できる」ものとして設定されている。設定に際しては、国際原子力機関（IAEA）及び国際放射線防護委員会（ICRP）等の関連文書^{9),10)}を参考としつつ、日本独自の環境を加味して現実的に起こり得ると想定される被ばくシナリオを想定し、個人が行動を決定する際に考慮に入れないとされるリスクレベル（ 10^{-6} /年）に相当する個人被ばく線量を算出（ 0.1 ミリシーベルト/年）した上で、安全を考慮して

さらにその十分の一の値である 0.01 ミリシーベル／年の被ばく線量となるようにクリアランスレベル（核種毎の放射エネルギー）が設定されている。この線量は、個人が自然界から受ける放射線量の百分の1以下の値である。クリアランスレベル以下であることが確認されれば、放射性廃棄物でない廃棄物と同様に解体・処分がなされ、資源として活用することが可能となる。本制度は、平成 17 年 12 月の「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（以下、原子炉等規制法）」の改正に伴って制定されている。

2. 2 核燃料サイクル関連施設等の現状

核燃料サイクル関連施設や試験研究用原子炉に関しても、基本方針⁷⁾においてリスク情報活用に関する言及がなされているが、施設数が少なく、施設の形態が多様であり、連続運転を目的としていないことが多いことなどから、定量的なリスク情報が十分に得られない場合が考えられるため、画一的ではなく、リスクの大きさや様態等の施設の特性や運転経験に応じて、安全確保・安全規制の合理性の向上等の観点から有用なものに関し、優先的な導入を図ることが適当であるとされている。

現状においては、規制面からのリスク評価の適用はなく、事業者によるデータの蓄積等により自主的な保安活動におけるリスク情報の活用が行われている段階である。ウラン加工施設などにおいては、PSA よりも簡易的なリスク評価手法である総合安全解析（ISA: Integrated Safety Analysis）が、事業者により試行的に実施されている。

3. 放射性物質輸送におけるリスク評価の現状

放射性物質輸送分野においては、研究レベルとしては、事故発生確率及び事故時環境影響等の評価¹¹⁾、¹²⁾がなされているものの、現在まで国内において規制側及び事業者側共にリスク評価の概念に基づく安全対策の試みはなされてきていないのが現状である。輸送にリスク評価が適用されてこなかった背景としては、固定施設と異なり評価対象が移動するために常に周辺環境が変化することから、考慮すべき事項が非常に多く評価が困難であったこと、及び陸上・海上輸送を問わず我が国における放射性物質輸送が非常に安全に行われてきたために、事故及び故障データが非常に少なく、精度の高い評価を行うための基本的情報が不足していることが要因として挙げられる。

米国においては、1970 年代に国家環境政策法が制定され、平常時の放射性物質輸送における周辺環境

への環境アセスメントが求められるようになったため、サンディア国立研究所において、輸送経路、経路周辺の人口密度及び交通量等を考慮に入れた放射線学的環境影響評価ツールとして RADTRAN が開発され、その後の改良を受けて現在ではリスク評価の概念を含めた RADTRAN VI が開発されている。国際原子力機構（IAEA）では、1995 年に国際的に使用可能な評価ツールとして米国の RADTRAN IV を基に開発した INTERTRAN II を発表している。しかしながら、各国の輸送事情及び事故形態、原因の複雑さから一概に上記ツールに当てはめにくいという事情もあり、本ツールは一部の国を除いて使用頻度も低く、開発も事実上停止している状態となっている。特に我が国においては、一部の原子力発電所で使用される前の原料又は燃料等の輸送（フロントエンド輸送）を除いて、核燃料サイクルの大部分を海上輸送に頼っているという世界的に見ても特殊な輸送実態を有しているという事情も、主に陸上輸送を対象とした INTERTRAN II の適用が進んで来なかった原因の一つであると思われる。

しかしながら、近い将来、我が国においては、原子力発電所の廃止措置に伴う施設解体によって発生する原子炉解体廃棄物輸送、MOX 新燃料輸送及び海外返還低レベル放射性廃棄物輸送など、現在の輸送物に加えてさらに多種多様な輸送物が発生するとともに、その輸送量も大幅に増加する見通しとなっている。このため、放射性廃棄物輸送の分野においても輸送の安全性を合理的に評価するためにリスク評価を適用する動きが始まりつつある。また、国際的にも、平成 20 年 10 月に開催された IAEA 輸送安全基準委員会（TRANSSC17）においても、最新の RADTRAN VI に基づいた新たな INTERTRAN の開発に関する提案がなされるなど、国際的な動きも見られるところである。

当研究所においても、放射性廃棄物の海上輸送の安全性評価におけるリスク評価手法の適用に資するために、放射性物質海上輸送における事故発生頻度を従来よりも合理的かつ高精度に評価するための研究として平成 20 年度から平成 21 年度にかけて「放射性輸送物の海上輸送におけるリスク評価に関する研究」を実施しているところである。また、事故時環境影響評価に関しても、当研究所では放射性物質海上輸送時に万が一事故が発生したときに、国土交通省からの依頼を受けて迅速にその周辺環境への影響を評価するための評価ツールとして「海上輸送に係わる原子力事故評価システム」を有しているが¹³⁾、本システムをリスク評価へも適用できるように、海洋及び大気拡散モデ

ルの改良、並びに海上のみでなく臨海地域までも含めた環境影響評価等、現システムの更なる高度化に取り組んでいるところである¹⁴⁾（図3参照）。

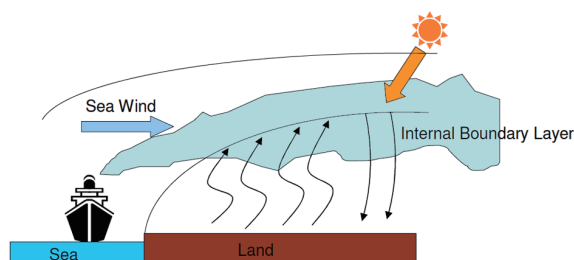


図-3 事故評価システムの高度化例¹⁴⁾

4. まとめ

将来的にも我が国における原子力エネルギーの重要性は高いと考えられ、その安全性をより一層、明確性、透明性及び合理性をもって示していくことが必須となる。そのための手段の一つとしてリスク評価は非常に有効な手法であり、今後とも原子力関連の各分野において、リスク評価を適用していくための研究及び活動を継続していくことが重要である。

参考文献

- 1)経済産業省総合資源エネルギー調査会需給部会：「長期エネルギー需給見通し」、2008年5月。
- 2)原子力委員会：「原子力政策大綱」、2005年10月。
- 3)原子力安全委員会：「発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策としてのアクシデントマネジメントについて」、平成4年5月。
- 4)原子力安全委員会：「原子力安全委員会の当面の施策の基本方針について」、平成12年1月。
- 5)原子力安全委員会安全目標専門部会：「発電用軽水型原子炉施設の性能目標について－安全目標案に対応する性能指標について－」、平成18年3月。

- 6)名雪哲夫：「リスク情報活用に係る基本方針及び今後の課題と方向性」、核燃料サイクル施設におけるリスク情報活用に関するワークショップ、平成20年1月。
- 7)原子力安全委員会：「リスク情報を活用した原子力安全規制の導入の基本方針について」、平成15年11月。
- 8)原子力安全委員会リスク情報を活用した安全規制の導入に関するタスクフォース：「リスク情報を活用した安全規制の導入に関する関係機関の取組みと今後の課題と方向性〔調査審議状況の中間とりまとめ〕（案）」、平成17年。
- 9)IAEA: "Clearance Levels for Radionuclides in Solid Materials: Application of Exemption Principles Interim Report for Comment, " TECDOC-855, 1996.
- 10)ICRP: "ICRP Publication 46, Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste, " Annals of the ICRP, 15, No.4, 1985.
- 11)IAEA: "Accident Severity at Sea during Transport of Radioactive Material, Report of the Coordinated Research Project on Accident Severity during Sea Transport, " TECDOC-1231, 2001.
- 12)津旨他：「海洋大循環モデルを用いた海洋中核種濃度評価手法の開発」、電力中央研究所研究報告、U99007、1999。
- 13)N. Odano, et al., "Development of Supporting System for Emergency Response to Maritime Transport Accidents Involving Radioactive Material, " PATRAM 2004, 2004.
- 14)N. Odano, et al., "Improvement of Atmospheric and Ocean Dispersion Model in Supporting System for Emergency Response to Maritime Transport Accident Involving Radioactive Material, " PATRAM 2007, 2007.