

原子力発電におけるリスク分析対象の拡大

○松岡 猛 (宇都宮大学)

1. はじめに

工学システムの可否をリスクをもとにして判断するアプローチが取られたのは原子力プラントが最初であった。

工学システムを数学的枠組み、確率的方法で評価する方法を提供した教科書“System Reliability and Risk Analysis”が MIT 教授 Ernst Frankel により 1960 年代初頭に書かれた。複雑なシステムのリスク評価における強力な理論的根拠を提供したのが 1972 年に出版された Green & Bourne [1] の著書である。

これに先立つ 1957 年にはアメリカ原子力委員会により WASH-740[2]が刊行され、重大な原子炉事故は 10^{-6} 炉・年と評価された。

1960 年代後半には Farmer が論文 [3] を出し、そこで有名な Farmer 曲線を示した。

一方航空分野では、1960 年代にボーイングとベル研究所がミニットマンミサイルの不慮の発射を防ぐ設計においてフォールト・ツリー解析[4]を使用した。1970 年代に航空機の確率論的分析が拡大していき、1979 年の DC10 の墜落事故により航空機安全評価が実施された。

NASA はアポロ 1 号の火災を契機として 1967 年に確率論的リスク評価 (PSA) の使用を開始した。NASA はかなり保守的な仮定をもとにアポロミッションの失敗確率を 0.1~0.8 と見積もった。この値が大きかったため PSA に対する不信感が航空分野で広がってしまった。しかし、チャレンジャー事故(1986)、コロンビア事故(2003)の後 PSA の必要性が復活し、原子力分野での経験が役立てられた。

原子力プラントの数が増大し、規模も大きくなり、1960 年代には公衆の間で原子力プラントは安全か否かの議論が高まった。1972 年にラスムッセ

ン[5]報告として知られる原子炉安全研究 (RSS) が開始された。業界、学会、政府からの 40 人の学者・技術者がスタッフとして参加し、4 百万ドル 3 年の歳月をかけて 1975 年に本報告は完成した[6]。

以後、原子力の分野ではこの PSA が定着しリスク分析が広く行われるようになった。

2. リスク分析対象の拡大

(1) 原子炉安全研究の内容

RSS では解析手法としてフォールト・ツリーとイベント・ツリーの組み合わせを用いている。6 種の配管破断 (LOCA) を起因事象として詳細に解析を実施した他、過渡事象も起因事象として検討している。更に複雑システムでは常に問題となる共通原因故障、人的過誤も解析に取り入れている。人的過誤の解析では Swain により開発された THERP 手法[7]を使用した。

SSR の問題点は機器の故障確率を推定するデータの不足であった。RSS では関連産業あるいは軍の類似機器の一般的なデータから得られた値を使用した。データの不確実さを取り扱うため故障確率として対数正規分布を用い、システム全体の不確実さを計算するためモンテカルロ法を使用した。

事故進展の結果、格納容器内への放射性物質の漏洩 (レベル 2)、さらには環境への放出(レベル 3)も解析した。

放射性物質の影響評価では、原子炉プラント周辺での天候データを用い、できるだけ現実的な人間影響、経済的影響、環境影響を評価した。

RSS 以前では過酷原子炉事故の場合、周辺への影響は膨大なものであろうと考えられていたが、RSS はこの影響は限定的であることを示した。

人間影響では、初期死亡、初期疾病、長期的健康被害を評価した。

更に、地震、浸水、竜巻、航空機衝突も推定し、それらは全体のリスクの中では小であると結論している。

最も論争を呼んだのは、100基の原子力プラントのリスクを一般大衆が被る他の一般的リスクと比較した部分であった。他のリスクとしては自動車事故、ハリケーン、竜巻、隕石、航空機、爆発、ダム決壊、火災、化学工場事故であった。これら種々のリスクの比較に Farmer 図を用いている。

RSS の計算した炉心損傷頻度は PWR で 6×10^{-6} / 炉・年、BWR で 3×10^{-5} / 炉・年であった。

この様に最初の本格的な確率論的安全評価 (PSA) である RSS で、以降の PSA の基本を全て実施してしまっていた。

後に実施した、個別の原子力プラントのリスク評価では炉心損傷頻度算出(レベル1)にとどめ、影響評価は RSS の結果から類推する形をとることが多かった。

(2) 停止時 PSA の実施

従来原子力プラントのリスク評価は当然のこととして出力運転中を対象としていたが、低出力運転時、停止時でも一部安全系、系統の停止等の条件が重なるとリスクは無視できないものがある。

我が国の定期安全レビューでは停止時 PSA は任意事項であったが、2003年に原子力安全・保安院が事業者に対して要請した。

2009年に発行された IAEA の安全指針 NS-G-2.15「原子力発電所のシビアアクシデントマネジメント計画」(DS385)[8]においては、停止時及び低出力時を含む内の事象並びに外的事象に対する AM 整備を求めている。

それらもあり、日本原子力学会では原子力発電所の停止状態を対象とした確率論的安全評価に関する実施基準(レベル1 PSA 編)の検討をすすめて2011年11月に完成させた。現在は2019年度の改訂版となっている。

この実施基準が今後の停止時 PSA の参考となっていく。

(3) 外的事象の評価

RSS では地震、竜巻、航空機衝突等の外的事象の検討をおこなったが、リスクは小であると判断し具体的な評価は実施しなかった。しかし、外的事象のリスクを無視するわけにはいかないということで、RSS の直後から検討が開始されてきた。

外的事象は不確かさが大きい稀な事象が含まれ、事故時の影響が甚大となる場合がある。このような場合にリスクをどう捉え、対策を如何に取るかが問題となる。

以下項目別に見ていく。

a) 地震

地震 PSA は米国で1980年、日本では1985年から開発が開始された。米国では NRC(原子力規制委員会)の指示により1990年代に簡易な地震 PRA(確率論的リスク評価)手法により個別のプラントの評価を実施し評価結果に基づきプラントの改善が行われた。

我が国は地震大国であるため、特に地震 PSA の必要性を強く感じ、日本原子力研究所をはじめ各組織で精力的に手法整備が行われた。2007年には原子力学会地震 PSA 分科会が「原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準」[9]を策定した。

2011年の福島事故を受けて地震 PSA の改定が必須であるとのことから改定作業が進められた。地震 PSA では地震ハザード、構造物等のフラジリティの評価が重要であり常に最新の知見を反映する必要がある。現在の原子力学会実施基準は2015年版となっている。

b) 火災

RSS が発行された1975年には Brown's Ferry 火災事故が発生し、原子炉が危機的な状況になった。そのため、原子炉内部での火災リスクの研究の必要性が強く認識された。

万一火災が発生し、消火作業、防護策が失敗した場合は重大な事態に至る。特に制御用のケーブルが集中した部分で火災が発生した場合は原子炉が制御不能の状態になることも考えられる。

火災 PSA では火災発生時の物理的な影響がシナリオ毎にどのように広がるかを評価する必要があり、簡易な評価ソフト COMBRN[10]が 1983 年には開発された。その後 EPRI が精力的に火災 PSA 開発を行い、1992 年には FIVE 手法[11]を発表している。2005 年には詳細な評価手法として公表した[12]。

日本でも 1992 年には日本原子力研究所が火災 PSA の研究に着手し[13]、海外と情報交換しながら研究を進めてきた。現在火災 PRA 実施基準 2014 年版が日本原子力学会から出ている[14]。

c) 津波

日本では、最初の原子力プラントを建設した当時から想定される津波高さを評価し対策をとることが求められていた。しかし、1970 年代から現在にいたるまで地震ハザード、津波ハザードの知見は大きく進歩してきており、最新知見を適切に津波対策に反映させる必要があった。

我が国の津波評価の考え方の推移は以下の様である。1970 年の原子力安全委員会の指針では「最も過酷と思われる自然力に耐えること」であった。1983 年の津波常襲地域総合防災対策指針では「確実な資料が得られる最大津波を対象」としていた。1997 年に「既往最大津波と現在の知見に基づいて想定される最大地震により起こされる津波の大きい方を対象」となった。2002 年に津波評価技術が作成され、「概ね信頼性があると判断される痕跡高記録が残されている津波を対象」となった。

2006 年の耐震設計審査指針（原子力安全委員会）では「地震随伴事象として極めて稀であるが発生する可能性がある」と想定することが適切な津波を対象」となり既往津波を超えるものも検討対象となったが、それでも予測できなかった津波が 2011 年に襲来し福島第一原発事故が発生してしまった。この経緯については学会の報告[15]に詳しく記載されている。

福島第一原発事故の発生までは地震規模の想定もできず、津波のリスク評価はまったく機能していなかったと言える。

ただし、旧原子力安全基盤機構は 2004 年のスマトラ沖津波を契機として津波 PRA 手法の整備を行い、津波シナリオを成果として発表していた[16]。福島事故後、日本原子力学会津波 PRA 実施基準(2012 年)にその成果は反映されている。

現在、原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準 2016 年版が日本原子力学会から出ている[17]。

d) 巨大火山噴火

巨大火山噴火は万一発生した場合、原子力発電所に対して大きなリスクとなる。

電気技術協会の指針[18]では、火山現象は非常に多様な現象であり、全ての現象に対して確率論的手法が確立されているわけではない。したがって、現時点における火山学に関する最新知見に基づき判断することとしている。

具体的な影響を考えると、火山灰等の堆積による荷重としての影響。大気中に浮遊する火山灰の建屋換気系や内燃機器の給気系等への影響。海面に浮遊又は海水中に懸濁する火山灰等が冷却水の取水域で浮遊・懸濁し、非常用冷却水の取水へ影響することが懸念される。

火山灰等がサイトに到達した場合、プラントを安全に停止し、高温停止状態から冷温停止状態へ移行し、かつ、冷温停止状態を維持し使用済燃料貯蔵プールについては冷却機能を維持する必要がある。

一つの火山の寿命は平均すると 40 万年程度であり、活動休止期間も十数万年程度のものが多い。このことから、原子力発電所の供用期間中に「活動の可能性を考慮する火山」としては第四紀に活動した火山を検討対象とする必要がある。

原子力規制委員会は 2018 年 3 月 7 日に「『設計対応不可能な火山事象を伴う火山活動の評価』に関する基本的な考え方について」を公表している。規制委員会では、巨大噴火によるリスクは、社会通念上容認される水準であると判断している。

具体的な事例に対する裁判所の判断の一つに四国電力伊方原発 3 号機の運転差し止めを認めた仮

処分決定がある（2021年1月17日）。阿蘇山については「過去最大の噴火規模時の火砕流が伊方原発敷地に到達した可能性が十分小さいと評価することはできない。」としている。

学术界の意見として藤井敏嗣（東京大学名誉教授）は「現在の火山学のレベルでは火山噴火予知の実現には程遠いことは確かであるが、より確実な火山防災のためには火山噴火予知研究を推進することは重要である。また、火山噴火予知が実用化する以前であっても、火山観測に基づく現実的な噴火対応に関して改善すべき点は多い。」と述べている[19]。

現状では巨大火山噴火リスクの評価手法は未確立の状態と言える。

e) その他

外的事象としては以上の他に、航空機落下、竜巻、内部溢水等があり内部溢水については原子力学会より実施基準が2012年に公刊されている[20]。

(4) テロ対策

2001年の同時多発テロを受け、2002年にNRCは、事業者に対し、暫定保障措置命令を発出した。そこでは「9.11航空機テロがあったことに鑑み、原発へのテロ攻撃に対し、強化・準備すること」と明記されている。

2013年に策定された新規規制基準では、従来電力会社の自主保安として実施していたテロ対策が新設され、意図的な航空機衝突を踏まえた対策が求められている。

テロ対策という性質上、テロ対策規制に関連した事項の詳細は不明であるが、セキュリティ不備が問題となったケースが我が国の原子力プラントで見られた。

テロに対するリスク評価と防護策の整備が重要な項目となっている。

3. まとめ

原子力プラントのリスク分析はその手法の基本ができてから順次対象が広げられてきている。特定の側面のリスク分析ではなく、あらゆる事象を

考慮した総合的な評価が要求されてきている。また、利害得失が関連する分野をも含めたリスク評価も必要と考えられる。

参考文献

- [1] Green A, Bourne A. Reliability technology. London: Wiley; 1972.
- [2] US AEC. WASH-740, Theoretical possibilities and consequences of major accidents in large nuclear power plants (AKA The Brookhaven Report); 1957.
- [3] Farmer F. Reactor safety and siting: a proposed risk criterion. Nuclear Safety 1967;539-48.
- [4] Ericson C., Fault tree analysis—a history. 17th International System Safety Conference, Orlando; 1999.
- [5] W. Keller, & M. Modarres, A historical overview of probabilistic risk assessment development and its use in the nuclear power industry: a tribute to the late Professor Norman Carl Rasmussen, Reliability Engineering and System Safety 89 (2005) 271-285.
- [6] US NRC. WASH-1400: reactor safety study (NUREG-75/014); 1975
- [7] Swain, A.D., Altman, J.W. and Rook Jr., L.W. (1963) 'Human error quantification', A Symposium SCR-610, Sandia Corporation, Albuquerque.
- [8] IAEA Safety Guide No. NS-G-2.15, Severe Accident Management Programs for Nuclear Power Plants (2009)
- [9] 日本原子力学会、原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準 (AESJ-SC-P006 :2007)
- [10] USNRC, NUREG/CR-3239, COMPBRN -A Computer Code for Modeling Compartment Fires (1983)
- [11] EPRI, Fire-Induced Vulnerability Evaluation (FIVE), (1992)
- [12] USNRC, NUREG/CR-6850 Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities (2005)
- [13] T. Matsuoka, Development of the Fire Risk Analysis Methodology for Nuclear Plants, Proceedings of the International Meeting of PSAM-II, San Diego U.S.A. (March 20-25, 1994), pp.102-1~7
- [14] 日本原子力学会、原子力発電所の内部火災を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：(AESJ-SC-RK007 : 2014)
- [15] 日本学術会議、報告「我が国の原子力発電所の津波対策—東京電力福島第一原子力発電所事故前の津波対応から得られた課題—」、2019年
- [16] 原子力安全基盤機構、津波に対する構造設計・リスク評価手引き (2013)
- [17] 原子力発電所に対する津波を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準 (AESJ-SC-RK004 : 2016)
- [18] 電気技術協会、原子力発電所火山影響評価技術指針 (JEAG4625-2015)
- [19] 藤井敏嗣、「わが国における火山噴火予知の現状と課題」、火山第61巻 (2016年)
- [20] 日本原子力学会、原子力発電所の内部溢水を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準(AESJ-SC-RK005 : 2012)