

# 原子力リスクと科学的意思決定

## 不確かであっても安全が保たれていると言えるのか

東京大学大学院 山口 彰

### 1. 不確かであること

ものごとが不確かであると認識することは、原子力安全に関する意思決定に求められる要件である。不確かであるとは、未だ知らないことがあるかもしれないし、既知と考えていることでも誤解があるかもしれないということである。そうであるにも関わらず安全が保たれるのかが問われている。

東日本大震災と福島第一原子力発電所の事故から4年以上が経過した平成27年8月に、新しい規制基準のもとで川内原子力発電所が再稼働した。規制基準への適合性が示された最初の原子力発電所である。その3ヶ月前の平成27年4月に、福井地裁は高浜原子力発電所の原子炉を運転してはならないとの判断を示した。その理由は、「基準地震動を超える地震はあってはならないはずである」、「基準地震動はその実績のみならず理論面でも信頼性を失っている」、「基準地震動を超える地震が到来すれば、(中略)炉心損傷に至る危険が認められる」、「基準地震動未満の地震によっても炉心損傷に至る危険が認められる」などである。この判決は、原子炉の安全設計や規制基準など、科学についての多くの誤解に拠っており、司法における科学技術の専門性の問題を提起したと言える。その点はおくとして、不確かであることを危険が認められることと認識し、原子力発電のように不確かとリスクを擁する技術の利用は回避すべきという判断がなされたことになる。不確かという科学技術の問題とリスク管理の関係の考察のもとに本来は判断すべきところ、リスク管理には焦点をあてず不確かは対処しようがないものであり回避すべきという論理である。

エネルギー基本計画(2014年4月)は、“原子力をエネルギー需給構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源”と位置づけた上で“原子力発電への依存度については確保していく規模を見極める”とした。それを受けて、長期エネルギー需給見通し(2015年7月)は、原子力発電の割合を20から22%とした。“安全性を全てに優先させ、国民の懸念の解消に全力を挙げる前提”として原子力を利用する、いわゆる3E+S政策(Energy Security, Economy, Environment それに Safety から3E+Sと呼ばれる)である。はたして、原子力安全は保たれるのか。経済産業省の総合資源エネルギー調査会の下に設置された原子力の自主的安全向上ワーキンググループ(2014)は、平成26年5月に原子力の自主的・継続的な安全性向上に向けた提言をとりまとめた。提言は以下のように述べている。“リスクガバナンス枠組みは、国家的危機一般に対する我が国全体としてのリスクマネジメントのあり方を検討していく上でも同様に有効であることが共通認識になった。然るべきリスクガバナンスの枠組みを危機管理に当てはめれ

ば、危機管理に関係する規制当局を含む政府、地方自治体、原子力事業者等の各主体が、相互の適切なリスクコミュニケーションの下で、危機に対して各々が備えておくべき核心的能力を見定め、未知のリスクに対するレジリエンスの向上を追求する形でのしかるべきリスクマネジメントを実践することが可能になる”。提言は、リスク管理は可能になると結論した。

二つの考え方の拠って立つ所の違いが際立っている。リスク回避戦略と、リスク管理戦略である。いうまでもなく、前者は福井地裁の判決に見られ、後者は自主的安全向上ワーキンググループの提言に見られる姿勢である。ひとつの技術を見つめている限りは、リスク回避戦略は最善に見えるかもしれない。しかし、ひとたび視野を広げれば複数の課題間の相互矛盾が顕在し、不確かな問題は実は全体最適を求めべき問題であるということに気がつく。一方、リスク管理戦略は不確かであるものを受け入れることを意味するから、そのリスクに果たして対処できるのかという不安がつきまとう。エネルギーの問題はこの類である。

## 2. 不確かさ～Unknown とリスクの管理

安全に関するさまざまなことからは不確かさが在ると認識すれば、重要な判断をするときには謙虚でありたい。リスク活用判断（Risk-informed decision）では、「知らない」、ということ而努力して認識しておかなければ、不確かさゆえに確率の罫（低頻度高影響事象など）に陥りやすい。適切なリスク活用判断は、不確かさをどのように理解し、いかに向き合うかにかかっている。つまり、リスクマネジメント（適切なリスク管理）である。

不確かさは、偶然に関係する不確かさ（aleatory uncertainty あるいは stochastic uncertainty）と認識に関係する不確かさ（epistemic uncertainty あるいは state-of-knowledge uncertainty）に分類される。確率論的リスク評価では、認識に関係する不確かさをパラメータの不確かさ、モデルの不確かさ、完全性の不確かさに分類している（USNRC, 2009）。ここでは、不確かさに備えるという観点から認識に関係する不確かさをリスク要因についての知識と認識によって分類する。図1に知識と認識で分類した4つの状態を示す。リスク要因の認識の度合いに応じて対処方針が決まり、リスク要因に対する知識の程度に応じて対処内容が決まると考えられる。

リスク評価は、不確かさを明示的にかつ定量的に示す。こうして得られた知識と認識に関する不確かさに応じて対処の方法も変わってくるであろう。安全問題について判断をするときはさまざまな状況がある。たとえば、(1)良く理解しており、高い確信度を持って判断できる、(2)ある判断でよいと思っているが確証はない、(3)その現象は、必ずしも否定はできないにしても起こりそうにないと考えている、(4)良くわかっておらず、不確かを理解し低減するためにはさらなる調査が必要であろう、などである。

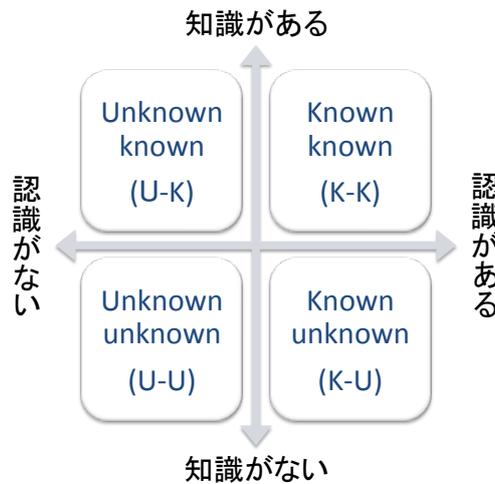


図1 知識と認識による不確かさの分類

図1のように知識と認識に関して二軸で整理すれば、それぞれの状況への対処の要諦を簡潔に明示することができる。(1)は、K-Kの例である。知識も認識も十分にある事象のリスク管理は確実でなければならない。またそのような事象についてはリスクに関する知識を高めるべく努力がなされる(認知度を高める)はずである。したがって、リスクの特性と不確かさを明示的かつ定量的に特性化できるので適切な判断がなされる。(2)は、K-Uの場合である。その重要性は認識されているが、特性が十分に理解されていないリスク要因である。知識が不十分か、適した定量化手法がないためにリスクと不確かさの定量化は容易ではない。(3)は、U-Kの例である。ある程度の知識はあり定量化が可能であるにもかかわらず重要性の認識が不十分であるため対処を先送りするなどである。(4)はU-Uであり、認識にも知識にも乏しい。重要性が広く知られていないので理解度も低く、知識や経験の欠如によりリスクと不確かさの定量化は極めて困難であるか不可能である。

以上の考察から、知識が乏しい場合にはデータや手法が不十分であるため不確かさの定量化は困難である。その一方で、リスク管理を実施するには不確かさが定量化されていなければならない。この矛盾をどう解決するか、不確かさを定量化するとはどのような意味かを次に考えてみたい。

定量(quantity)とは、“fact of being measurable<sup>1)</sup>”である。ウィリアム・トムソン(初代ケルビン卿)は、“科学を学ぶにまず大切なことは、対象とする問題の特性を測定する数値評価と実践的方法の一般則を見出すことである。その問題について論述するとき、測定して数値で表現できるならばものごとがわかっていると云える。そうでなければ知識は中途半端でそれは科学

<sup>1)</sup> Longman Dictionary of Contemporary English, New Edition

と呼ぶに値しない[PLA, vol. 1, "Electrical Units of Measurement", 1883-05-03]”と述べる。つまり、測定できること (measurable) が大切である。ここで、“測定”を、統計データが揃っていることと単純に解釈してはならない。不確かさを扱う科学では、利用可能であるエビデンス全体を総合的に判断してわかっていること (Known) とわかっていないこと (Unknown) を明らかにすることが不確かさを測定するということである。リスクの定量化とは、知識・知見の程度と不確かさを測定することであり、リスク要因に関する認知度を高める科学である。客観的なデータが少なければリスクの定量化はより困難な作業になるが、不可能ではない。ベイズ統計科学などの手法も用意されている。

もう一度、リスク管理の目的に立ち戻る。それは、より良い意思決定をするために、リスクを評価し最適化するとともに未知のリスクに対するレジリエンスを向上させることである。その結果、知識・知見の現状をリスクによって表現し、わかっていないことを理解することができる。リスク評価は利用可能なエビデンスを存分に活用して行われるべき作業である。

さて、リスクと不確かさに直面する分野は原子力だけにとどまらない。どちらかといえば、原子力分野に比べて不確かさについてそれほど調べられていない、あるいは知る努力がなされていない分野の方が多いかもしれない。リスクの認識の低さゆえ、ときに大きな脅威をもたらしかることになる。一般論として、不確かさをどのように考え対処するかは、リスク管理戦略 (リスク・ニュートラル) かリスク回避戦略 (リスク・アバース) のいずれを志向するかによる。知識・知見が不完全であっても、その状態と不確かさが測定され重要性が認識されていれば、重大事故時にもその影響を有効に緩和できる可能性が格段に高まることは東日本大震災の経験 (原子力安全推進協会, 2012a, 2012b) から示される。リスク認知度が高く、レジリエンスが備わった状態と言える。

リスクと不確かさを何によって測定すればよいのか、Kaplan ら (1981) によるリスクトリプレットが参考になる。リスクトリプレットは次の三つの問いかけである。

- ① What can go wrong? : シナリオ
- ② How likely is that to happen? : 起こりやすさ
- ③ What are the consequences If it does happen? : 影響の度合い

リスクは、必ずしも「ある事象の発生頻度×影響度」ではない。リスクの定量化とは、意思決定とコミュニケーションに使えるような形でリスクトリプレットとして示すことであり、数字で表現しても定性的な記述でもよい。

リスクの定量化は、透明性ある方法、つまり科学的方法によらなければならない。それはリスク評価手法である。リスクはエビデンス全体を総合的に判断して評価されると述べた。

Garrick (2008) は、観測 (observation), 知性 (intelligence), 一般的な経験 (general experience), 特別な調査 (special investigation), 専門家判断 (expert judgment) がエビデンスであると云う。観測されたデータがエビデンスであると考えがただが、それはエビデンスの一部に過ぎない。リスク評価手法とエビデンスにより、直接的に経験したことだけでなく稀にしか経験しないか未経験の事象に関するリスクを推定することができる。

不確かさについてエビデンスを補強する方法として感度解析がある。さまざまな仮定や判断がリスクに及ぼす影響を把握する感度解析は新しい観測事実を示すものではないが、わからないことに関するエビデンスを与える。リスク評価の一種であるストレステストは、特定のシナリオに限定してシステムの弱点やリスクの様相、つまりシナリオが転換する条件 (クリフエッジと呼ばれる) を示し、影響緩和戦略の有効性判断に有用な、わからないことに関するエビデンスを示す。

### 3. リスク管理と深層防護

リスク管理により、原子力の安全はどのように保たれ不確かさに備えているかを考える。図 2 に、リスク管理の観点から原子力の安全を分析して示す。リスク管理はリスクガバナンスの一要素である。そのほか、リスクのプレアセスメント、リスク評価、リスクの特徴付け/判断より構成される。原子力発電所の安全設計と関連付ければ、プレアセスメントは適切な設計基準により重大事故を防止することに相当する。安全設計の有効性についてリスク評価がなされる。その結果、リスクの観点から重要と判断されるシナリオについてはリスク管理の手段が取られる。重要でないと判断されるシナリオは残留リスクと理解する。その判断は、リスク管理者の安全確保活動の深さと広さを定める目安であり、同時に絶え間ない社会との対話にもとづき定められる安全目標を参照しつつ総合的になされる。残留リスクとみなされたシナリオについても放置するわけではなく、緊急計画や訓練を用意した上で新知見と運転経験を精査しながら継続的な安全向上に意を尽くす。

設計基準による重大事故防止は K-K の領域である。リスク評価によりリスク管理されるシナリオは K-U である。また、残留リスクとみなされるシナリオは U-K である。リスク評価とは想定したシステムと脅威に対してリスクトリプレットを分析する科学であるので、U-U のシナリオが残されているかもしれない。これは、知識・知見の不完全によってもたらされるものである。そこで、新知見や運転経験に最新の注意を払い、分析能力と認知度を高めることが求められる。重大事故の発生防止、シビアアクシデントマネジメント、緊急時計画と対応という、深層防護の三つの層に相当する対処がそれぞれ、K-K, K-U, U-K に対応していると解釈できる。4 種類の不確かさの特性とリスクと不確かさの考え方を表 1 に示した。

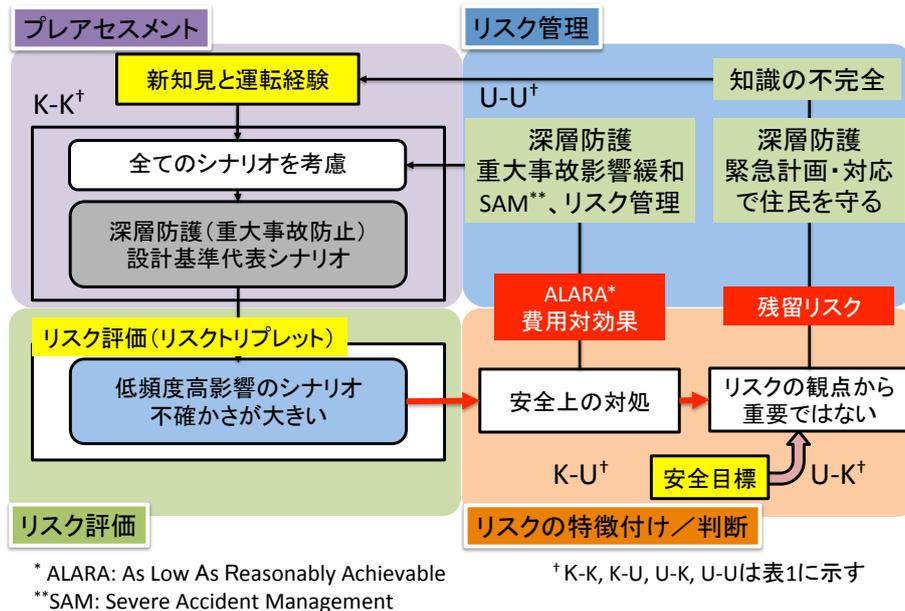


図2 リスク管理と深層防護

表1 認識と知識の不足への対応

|                 | 認識 | 知識 | リスクの考え方       | 不確かさへの対処      |
|-----------------|----|----|---------------|---------------|
| Unknown Unknown | —  | —  | 不確かかの同定と認知度向上 | 新知見と運転経験の反映   |
| Unknown Known   | —  | ○  | 残留リスク         | 深層防護（緊急計画・対応） |
| Known Unknown   | ○  | —  | 最適化すべきリスク     | 深層防護（リスク管理）   |
| Known Known     | ○  | ○  | 確実な対策と有効性評価   | 設計基準体系の構築     |

#### 4. 不確かさへの対処の事例

東京電力福島第一原子力発電所では津波高さの想定の問題が議論されている。津波に対する東京電力の取り組みの経緯（2913）を、以下に簡単に述べる。運転開始当初は既往最大津波としてチリ津波（3.1m）が参照された。2002年には日本土木学会の「原子力発電所の津波評価技術」により5.4～5.7mと見直されたが福島県沖の津波源を想定はしなかった。同年、地震調査研究推進本部が三陸沖北部から房総沖の日本海溝沿いのどこでもM8.2級の地震が発生する可能性があるとの見解を公表したことを受けて、確率論による評価を検討したが、不確かさが大きく適用には至らなかった。2004年にスマトラ島沖地震による津波でインドのマドラス発電所に浸水する。2006年には関係者は溢水勉強会に参加し、ストレステストに近い検討を行ったが、土木学会の評価は十分な保守性を備えていると考えた。2008年に福島県沖に津波源を想定した試評価を行った結果、15.7mの津波高さとなった。防護対策の費用などを検討した上で、

の技術的妥当性を確認するため、想定すべき津波波源モデルの検討を土木学会に依頼する。

以上の経緯から、津波対策を施すための情報、評価結果、経験、知見を東京電力は有していたと考えられる。しかし、直ちに対策を取るべきとは考えなかった。そのため、対策が先送りにされた。対策に万全性と完全性を求めるあまり、重大事故の生み出す公衆リスクを抑制するという安全の本質と不確かであることを忘れ、具体的な対処をすることなく東日本大震災の日を迎えた。つまり、対策をするに十分な知識は蓄積されるも、リスクトリプレットの観点からの重要度と必要性の認識が組織として共有されなかった。知識が徐々に蓄積されていっても不確かであることの認識がなければ対策が取れない、U-Kに相当すると考える。

新しい規制基準では、竜巻や森林火災を考慮することになった。リスク要因として明示的に認識されたわけである。しかし、それが及ぼす影響や事象進展、発生頻度などのリスクは定量化されていない。現時点では、安全余裕を十分に確保した対策がとられている。取られている対策の有効性については評価する必要がある、その他の重大事故対策などと調和を保ちながら、リスク最適化を図る必要がある。これはK-Uの事例である。多くの場合、K-Uに関する認識は、国内外の運転経験や他産業などからの知見によってもたらされる。リスク源として認識されたが対策を実施しないと判断する場合には、いつまでに実施するか、そのことによるリスク増加はいくらか、補償措置をとるのかなどを分析・検討し、取られた方針の合理性が説明されなければならない。当然、論理的に合理性が認められればそれは許容される。一例を示すと、規制委員会は、特定重大事故対処施設の設置に5年の猶予を設けた。充実したシビアアクシデント対策、とりわけ可搬型設備や物理的分離による独立性・多様性強化、敷地内と敷地外からの支援などの対策を講じたことにより、特定重大事故対処施設の機能を補っていることとリスクは低い水準に抑制されていることが判断の理由と考えられる。

2001年9月11日に米国で同時多発テロ事件が発生し、世界貿易センタービルにハイジャックされた航空機2機が激突し、大規模な火災・爆発に至った。原子力発電所の安全設計においてこうした事態をあらかじめ想定しておくことは困難であろうが、米国は、大規模火災・爆発によるサイト喪失の対策として、内部設備と外部からの対策を組み合わせる炉心と格納容器、及び燃料プールの冷却を確保するという戦略を構築した。B.5.bとして知られるところである(東京電力, 2012)。設計基準を超える事象としては米国規制委員会が例外的に要求した措置である。これは、U-Uであっても原子力安全を阻害するかもしれないテロリズムなどの経験とその分析に敏感であることにより、U-UをK-Uに転じた事例である。U-Uへの対応の成否は、運転経験と新知見の深い理解によるリスク抑制の継続、つまりリスクに取り組む風土の醸成につける。原子力安全の歴史で多くの設計改善や規制要求の見直しがなされてきたことは、U-Uに対する取り組みの成果である。これを継続的安全向上という。

設計基準として体系化されているものはK-Kであるが、設計基準事象の必要性と十分性は定

期的に見直しがなされなければならない。米国原子力規制委員会は、全電源喪失やスクラム失敗事象を設計基準外と位置付け、設計基準事象そのものを見直すことなしにいわゆるパッチワーク規制を行ってきたことの反省を述べている（USNRC, 2011）。我が国は、設計基準事象を見直すことに対しては、外部に対する説明の整合性やバックフィットによる稼働率低下などの、安全を保つこととは別の理由による強い抵抗感をもったことを反省する必要がある。

## 5. 深層防護と自主的安全向上 — リスクの管理目標と不確かへの備え

安全が保たれているということは不確かであることと背中合わせである。しばしば、許容できる安全の水準を決めてほしい、そうでなければどこまで対策をとればよいのか決められないという声を聞く。ゼロリスク願望が幻想であることは、今や異論をはさむ人はいないだろう。プラントの安全性は完全でなく不確かがあることを認めることが自主的安全向上の第一歩である。リスクガバナンスは、安全を維持するためのリスク管理が継続的に自主的に機能する枠組みのことである。そして、国際的にも共有される概念である「深層防護」は不確かを備えるための安全の論理である。

原子力規制委員会の定めた新規制基準は、原子力発電所の備えるべき性能として、①炉心損傷の防止、②重大な炉心損傷への進展防止、③格納容器の損傷防止、④大規模な放射性物質の放出・拡散防止、の4項を設定した。原子力規制委員会は、深層防護を新規制基準の基本とすると述べている。深層防護は、防止と緩和の適切な組み合わせ、すなわち、性能目標を達成するための対策（防止）とそれに失敗した時の影響に対する備え（緩和）である。緩和対策が必要な理由は、万全と考えた防止対策は完全ではないからである。そして緩和方策は次層の防止対策へと繋がることによって各層は互いに連携する。

4つの性能要求に「設計基準事象の発生防止」を加えて安全目標を達成するための深層防護と安全対策（図3）を描いた。設計基準事象の発生防止は、設計基準に課された性能目標である。安全目標を達成するために複数の性能目標をおく理由は、より具体的な下位目標があった方が安全目標の達成度を評価するとともに改善をする方策を見出しやすいからである。層の数を増やせばより安全になると誤解されることがある。深層防護は、目標を達成するための防止戦略と緩和戦略の適切な組み合わせであって、層の数は問題ではない。安全目標を達成するために、性能目標をどのように構築・設定するかが層の数に相当する。

安全目標を達成するための性能要求(放射性物質の閉じ込め性能)

|    | 事故の発生防止      | 炉心に閉じ込め     | 原子炉容器に閉じ込め     | 格納容器内に閉じ込め | サイト内に閉じ込め          |
|----|--------------|-------------|----------------|------------|--------------------|
| 防止 | 設計基準事象の発生を防止 | 炉心損傷の防止     | 著しい炉心損傷への進展の防止 | 格納容器の損傷を防止 | 放射性物質の大規模な放出・拡散を防止 |
| 緩和 | 緩和系設備で収束     | 重大事故対策設備で収束 | 格納容器に閉じ込めて収束   | 放射性物質放出を管理 | 敷地外緊急時計画と対応        |

図3 安全目標を達成するための深層防護と安全対策

自主的安全向上の本質は、不確かさの特性化と定量化である。適切な性能目標とリスク評価により、リスクを管理しつつ不確かさを調べ、吟味し、不確かさの特性に応じて認識と知識を向上させる。リスクの定量化により性能目標の達成度合いを調べ、残留リスクが許容できる程度に抑制されていること、さらなる設備や手順の追加の必要性、実効的で現実的な対策の選択、プラントの安全状態の判断を行い、それらを社会に対して説明する。深層防護はこうした不確かさに備える考え方である。性能要求は互いに独立な防止対策と緩和対策の適切な組み合わせで達成される。緩和対策は防止対策の不確かさを補うべく実効的で現実的でなければならない。すべての性能要求に対してこの考え方を適用し、各層が連続的につながった深層防護が構築され、安全の目標が達成される。安全を保つ上での安全目標と性能目標の意義や、定めるべき性能要求は何かといった議論は、我が国に欠けているのではないか。原子力規制委員会は、特に重大事故に関して性能目標をきめこまかく考えよと求めたと理解している。

電気事業者の自主的安全向上活動と原子力規制委員会の規制活動は、不確かさに備えるリスク管理の枠組みを構成する。原子力安全の目的をより確実にするために、複数の性能要求を適切に定めるとともに、防止戦略と緩和戦略を組み合わせることで不確かさに備える深層防護の考え方が基本となる。この枠組みのもとで関係者が安全を保つ努力を不断に重ねていることを、国民に知っていただかなければならない。不確かかであっても安全が保たれているのは、これらを実践するリスク管理戦略に支えられているからであり、これには関係者の安全文化とリスク文化が欠かせない。

文献

経済産業省 (2014), 原子力の自主的・継続的な安全性向上に向けた提言, 総合資源エネルギー調査会 原子力の自主的安全性向上に関するワーキンググループ, 平成 26 年 5 月 30 日, pp.39-40.  
 USNRC (2009), Guidance on the Treatment of Uncertainties Associated with PRAs in Risk-Informed Decision Making — Main Report (NUREG-1855, Volume 1)

原子力安全推進協会（2012a），東京電力（株）福島第二原子力発電所東北地方太平洋沖地震及び津波に対する対応状況の調査及び抽出される教訓について，2012

原子力安全推進協会（2012b），女川原子力発電所及び東海第二発電所 東北地方太平洋沖地震及び津波に対する対応状況について，2012

S. Kaplan and B. J. Garrick（1981），On The Quantitative Definition of Risk, Risk Analysis

B. J. Garrick（2008），Quantifying and Controlling Catastrophic Risks, Elsevier

東京電力株式会社（2013），福島原子力事故の総括及び原子力安全改革プラン，2013年3月29日

東京電力株式会社（2012），B.5.bはどうしたら知り得たか? 2012年12月14日 第2回原子力改革監視委員会配付資料

USNRC（2011），Recommendation for enhancing reactor safety in the 21<sup>st</sup> century, 2011