

日本原子力学会原子力安全部会主催
第6回「原子力安全夏期セミナー」
2018年8月20日～22日

外的事象に対して 原子力発電所に求められる性能とそ れを達成するための枠組みについて

糸井 達哉（東京大学）

本発表の内容

- わが国の原子力施設は、欧州等の諸外国と比較して地震などの過酷な自然環境下にあることから、一般の構造物と同様、自然起因を含む外的事象が事故の主要な誘因
- 福島第一原子力発電所事故以降これまでの議論の進展も含め、外的事象に対する安全確保の枠組みについて考え方（私見も含む）を提示すること
 - ✓特に、多様な外的事象に対する安全性確保、継続的な安全性向上の枠組みは、どのようにすれば成立するのかについて、深層防護、不確かさへの対処、リスク情報の活用、安全研究等の観点から議論

外的事象 (External Event) とは

- IAEA Safety Guide NS-G-1.5 (2003)には以下のよう記載
 - ✓原子力施設の敷地外、あるいは敷地境界内において原子力発電所の運転に直接関わらない部分に、端を発する事象
 - ✓そのような事象は、自然起因あるいは人為起因であることが考えられる。
 - ✓これらの事象のうち重要な事象は、立地評価のプロセスにおいて、設計基準外的事象 (DBEE) として同定され、選択する。

事故や起回事象の誘因となる事象の分類

プラントの設備機器のランダム故障等	
外的事象（施設外で発生する事故の誘因となる事象）	自然起因の事象
	地震（地震動、断層変位、地盤変状等）、津波、洪水、火山、強風（台風、竜巻）、低温など
	人為起因の事象
	事故的航空機落下／意図的航空機落下、外的火災*1 など
内的事象（施設内で発生する事故の誘因となる事象）	施設内溢水(浸水)、施設内火災、タービンミサイルなど

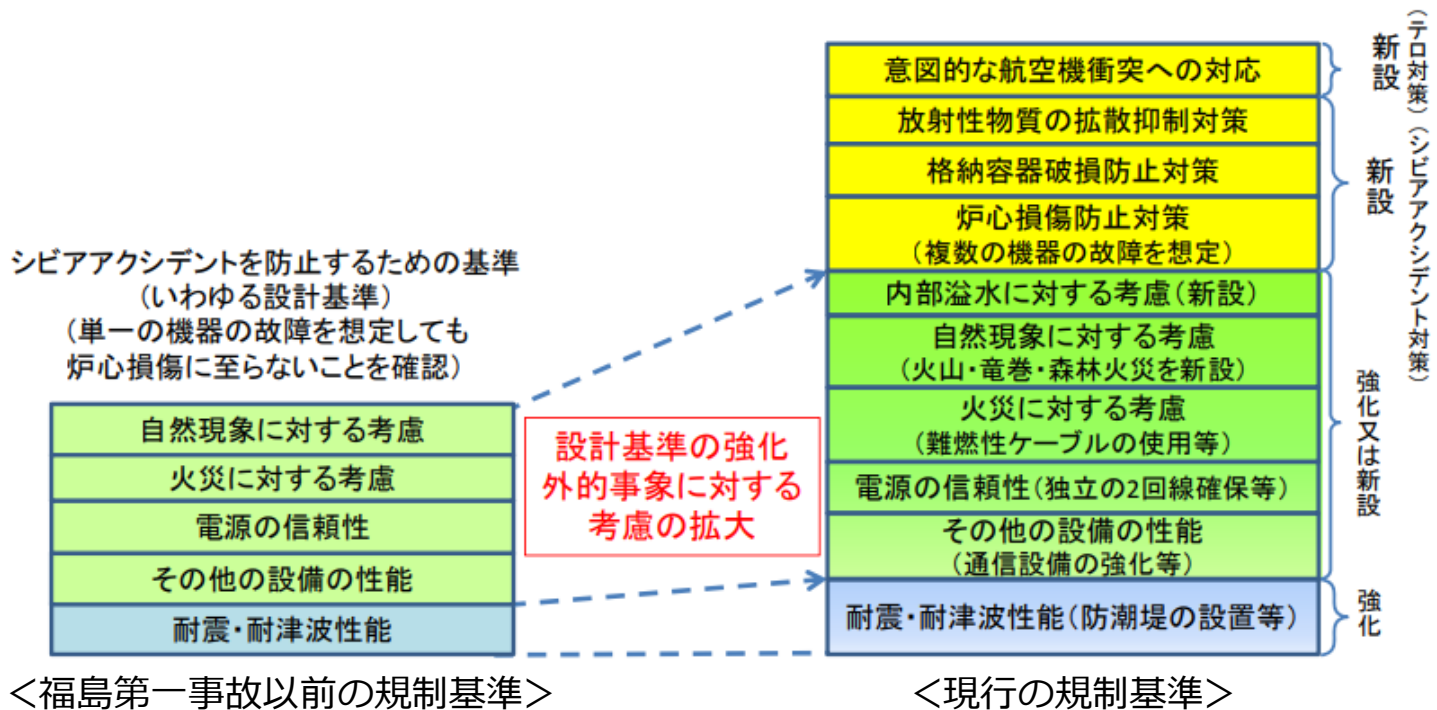
*1 自然起因の事象の場合もある

外的事象（自然起因の事象）に絡んだ 原子力発電所の事故・事象例

- 1992年 ターキーポイント原子力発電所(米)
 - ✓ハリケーンアンドリューの襲来により、サイト内外で被害。最大瞬間風速(約)80m/s。プラント停止の時期、事前準備、外部とのコミュニケーション、外的事象に対する設計対象外となっているSSCに対する代替措置、安全上重要でないSSCの被害の波及影響等が議論に。
- 1999年 ブレイ工原子力発電所(仏)
 - ✓嵐により河川が氾濫し浸水。注水ポンプと格納容器安全系が機能喪失し、緊急停止。
- 2003年 マトラス原子力発電所(印)
 - ✓スマトラ沖地震・津波の影響で、居住施設にいた所員5名が津波で死亡。近隣のFBR原型炉の建設現場でも浸水し被害。
- 2007年 柏崎刈羽原子力発電所(日)
 - ✓基準地震動を大きく超える地震動に見舞われ、微量の放射性物質が海へ。再稼働の考え方、基準地震動超の性能（耐震裕度）、地震動予測法などが議論に。外部電源用の油冷式変圧器の火災。
- 2011年 福島第一原子力発電所事故等(日)

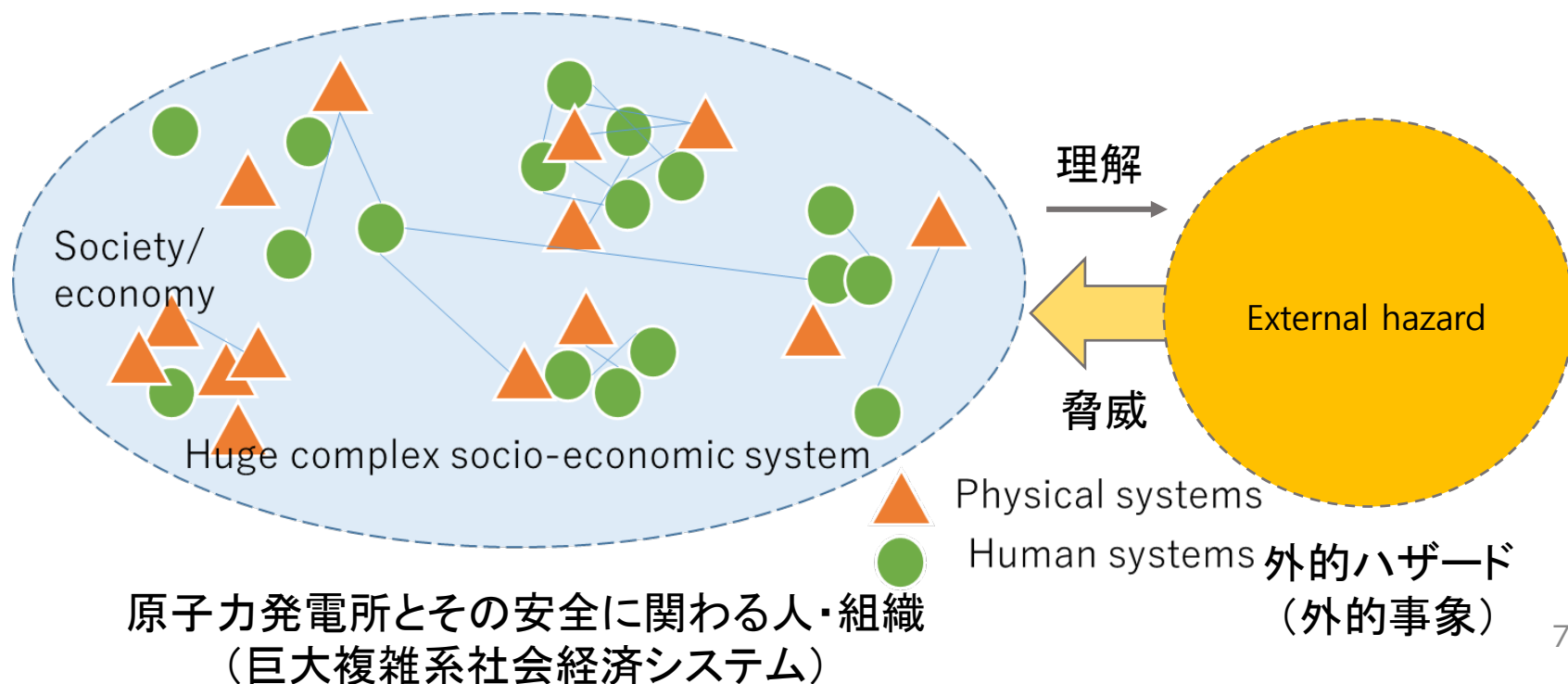
福島第一事故の教訓を踏まえた規制基準

- 耐震・耐津波の要求の強化、網羅的な自然事象の考慮、意図的な航空機衝突への対応等、外的事象に対する規制要求が強化
- さらに、安全性向上評価制度に基づき、事業者自らが、最新の知見を踏まえ、発電所の安全性向上に必要な措置を講じ、その有効性を評価
 - ✓福島第一事故は、外的事象に対する考え方の変化をもたらした
 - ✓外的事象の網羅的な再評価と対策の検討が根幹のひとつ



外的事象に対する原子力発電所の安全性を議論する際の議論の範囲（前提）

- 外的事象に対する原子力安全は、「外的ハザード（外的事象）」だけでなく、「原子力発電所とその安全に関わる人・組織(社会・経済も含む)」も含めた両面からの議論が必要



外的事象に対する原子力発電所の安全性を議論する上でのいくつかの論点 (1/2)

- 外的事象の種類によって異なるプラントの挙動を把握できるか？ 外的事象に対して、原子力発電所はどの程度頑健か？
- 共通原因故障の可能性を減らすための、物理的分離と機能的隔離、多様性などの考え方は？ また、それは、どの程度有効か？
- ハザード評価やリスク評価における未知も含む認識論的不確かさは、安全性に関わる意思決定や対応策の実施において活用できているか？ どのように活用するか？
- 地震動と津波、強風と高潮など複数のハザードの同時(連続)発生、組合せの考え方は？
- 外的事象が、内的事象（施設内の火災・浸水）を引き起こし、事故に至る可能性、それに備えた対処は？

外的事象に対する原子力発電所の安全性を議論する上でのいくつかの論点（2/2）

- 気象現象のように事前・直前の予測とそれに基づく準備期間が取れる外的事象の場合、その備えはどのようなものとなるか？
- 緊急時を含め、発電所の所長等幹部と運転員を含む所員の間での情報伝達はどうか適切か？
- 緊急時を含め、発電所と外部（国や地方自治体も含む）との情報共有の考え方は？
- 以上のような観点から発電所所員を含む関係者が適切な能力を持ち、能力強化を継続する枠組みは？

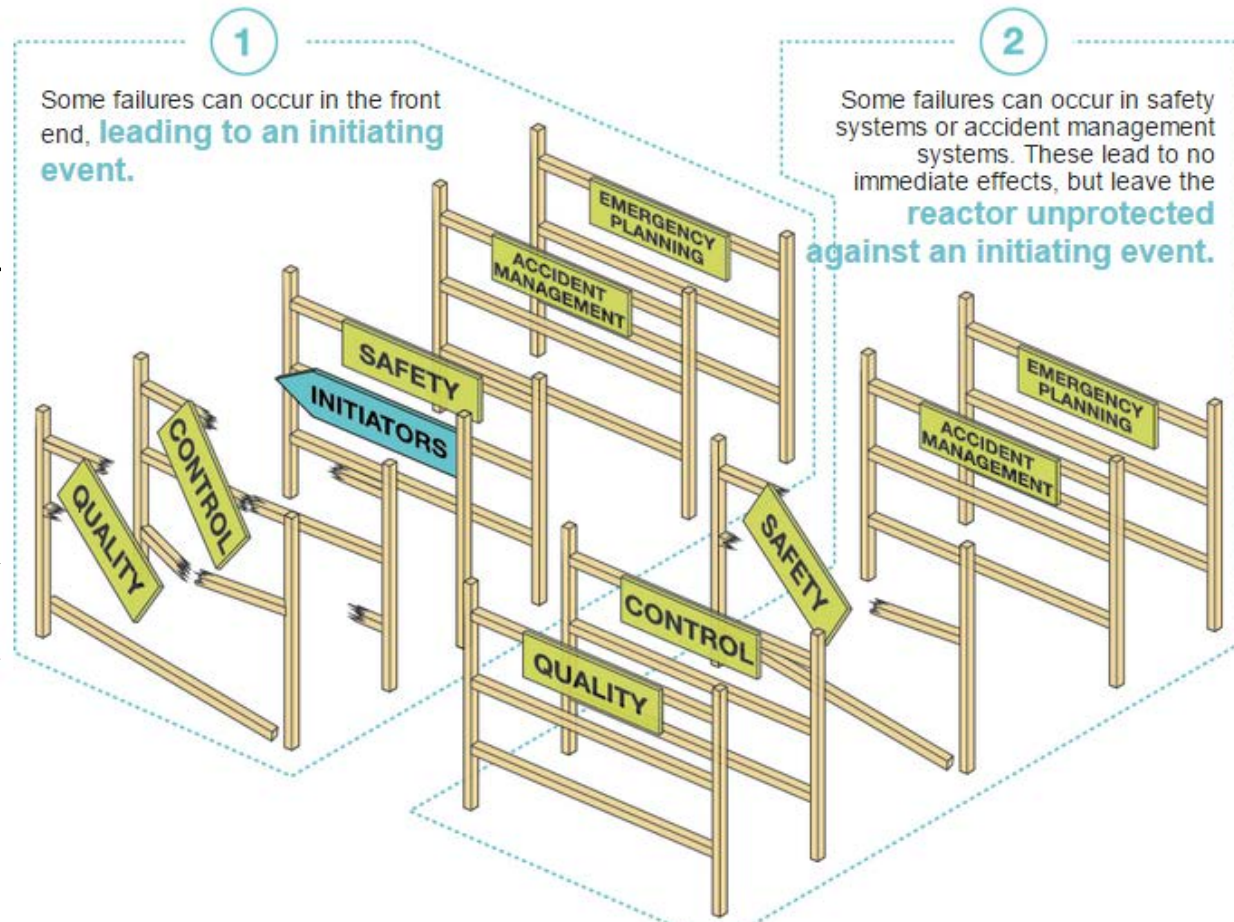
共通原因故障の可能性を減らすための、物理的分離と機能的隔離、多様性などの考え方は？また、それは、どの程度有効か？

外的事象に対する深層防護と共通原因故障

- 規模の大きな外的事象では、以下の2つの機能喪失が同時に起こりうる

- ① 起因事象（発端事象）を発生させるようなSSCの機能喪失
- ② 深層防護後段レベルの機能喪失

- 深層防護の各レベルの完全な独立性は成立しない



<https://iec.iaea.org/inesrilt/initiator>

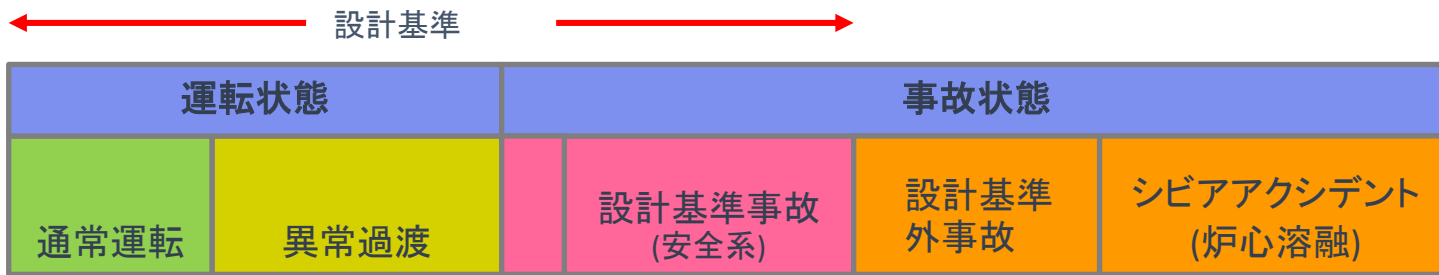
外的事象に対する深層防護の有効性に対する考え方について

- 福島第一原子力発電所事故前は、外的事象に対する「深層防護」、特に設計基準を超える外的事象の取扱いの文脈において「深層防護」に関する具体的な議論は不足（必要性は認識）
 - ✓ 「深層防護」は、設計基準の外的事象に対して有効性を維持すべきものという認識
 - ✓ 設計基準を超える外的事象に対する深層防護も含めた安全性確保の考え方については、2000年ごろからクリフエッジ効果の考え方とクリフエッジを防止するためのPRA（確率論的リスク評価）活用の有効性に関する議論

(参考) 深層防護と(新設炉)設計の考え方の変遷

- IAEA INSAG-10(1996)
 - ✓ 原子力発電所のプラント状態に対応した5つのレベル
- IAEA SSR-2/1(2012)：深層防護のレベル4(従来の設計基準外事故)に対する設計の概念として設計拡張状態が提示
 - ✓ 多重故障も含めた重要な事故シナリオについて、従来の設計基準とは異なる概念である設計拡張状態として考慮することで設計領域の拡張

従来の深層防護と設計基準の関係



IAEA SSR-2/1(2012)



(参考) 深層防護と(新設炉)設計の考え方の変化

- IAEA SSR-2/1 rev.1 (2016)

- ✓ プラント設計においては、設計で考慮する外的ハザード (中略) に対して安全上重要なものを防護するため、また、クリフエッジ効果を避けるために必要な十分な裕度を付与しなければならない。(5.21)

- ✓ プラント設計においては、さらに、設計での考慮を越えるレベルの自然ハザードに対して、放射性物質の早期放出や大量放出を防止するために最後の砦を防護するために必要な十分な裕度を付与しなければならない。(5.21A)

- (最終ヒートシンクへの)熱輸送の機能は、(略)設計で考慮する自然ハザードを越えるレベルにおいても機能させなければならない。
- IAEA TECDOC-1791 (2016)で最低限必要として挙げられているSSCs：格納容器構造物、溶融炉心の格納・格納容器からの除熱・シビアアクシデント時の最終ヒートシンクへの熱輸送に必要な系統、水素爆発を防止する系統、(非常用電力供給を代替する)代替電力供給、上記システムの機能のために必要なサポート系と計装制御系、制御室

(参考) 深層防護と(新設炉)設計の考え方の変化

- IAEA SSR-2/1 rev.1 (2016)

- ✓要件24：共通原因故障

- 設備の設計においては、安全上重要なものに対する共通原因故障の可能性があることを、十分考慮しなければならない。その上で、必要な信頼性を確保するために、多様性、冗長性、物理的分離、機能的隔離の考え方をどのように適用されなければならないかについて、決定をしなければならない。

- ※ 「冗長性」は外的事象による共通原因故障には、それほど効果的でないと考えられる

- ※ 「物理的分離」や「機能的隔離」は、共通原因故障ではない、従属的な機能喪失を避けるために(も)必要と考えられる

外的事象に対する深層防護の有効性について

- 外的事象に対する立地
 - 外的事象に対する設計基準の設定
 - ✓ 安全目標やそれに対応した要求性能に対応した保守的な設定
 - 設計基準を超える外的事象に対する備え
 - ✓ 裕度、物理的分離と機能的隔離、多様性により、共通原因故障を可能な限り防ぐ備え
 - リスク評価を含めた多面的かつ相補的な評価により、対策の必要性や対策の妥当性を確認
 - ✓ 設計基準を大きく超え、設備のみでの対応が困難な状況の備えとして、プラント内外の人や組織による可搬型設備等も活用した事故対応（警報等を受けた災害発生直前の対応も含む）
- 事故影響緩和の備えは事故の防止と同等に重要

ハザード評価やリスク評価における未知も含む認識論的不確かさは、安全性に関わる意思決定や対応策の実施において活用できているか？どのように活用するか？

継続的な安全性向上の取り組みにおける リスク情報活用

- 外的事象に対する網羅的、かつ、その重要性に応じた精度でのリスク評価
 - ✓ 地震や津波などそれによるリスクが大きいと考えられている外的事象
 - ✓ 台風や竜巻などの強風や火山噴火に伴う降下火砕物、人為事象を含むその他の外的事象に対する網羅的評価
 - ✓ それらの作用の重畳
- 確率論的リスク評価（PRA）の不完全さと不確かさ
 - ✓ リスク評価結果の直接的な利用については、予測の不完全さや不確かさの程度を見極め活用
 - 絶対値が大きくても不確かさが大きいと判断が鈍るという側面も
 - ✓ 不確かさがどの程度かを把握することも含めた、より広い観点からのリスク情報の活用は、不作為を避けるという点も含め、安全性向上のための重要な情報
 - ✓ 確率論的リスク評価（PRA）以外のリスク評価手法の活用も

外的事象に対するリスク・ハザードを評価することで見えること

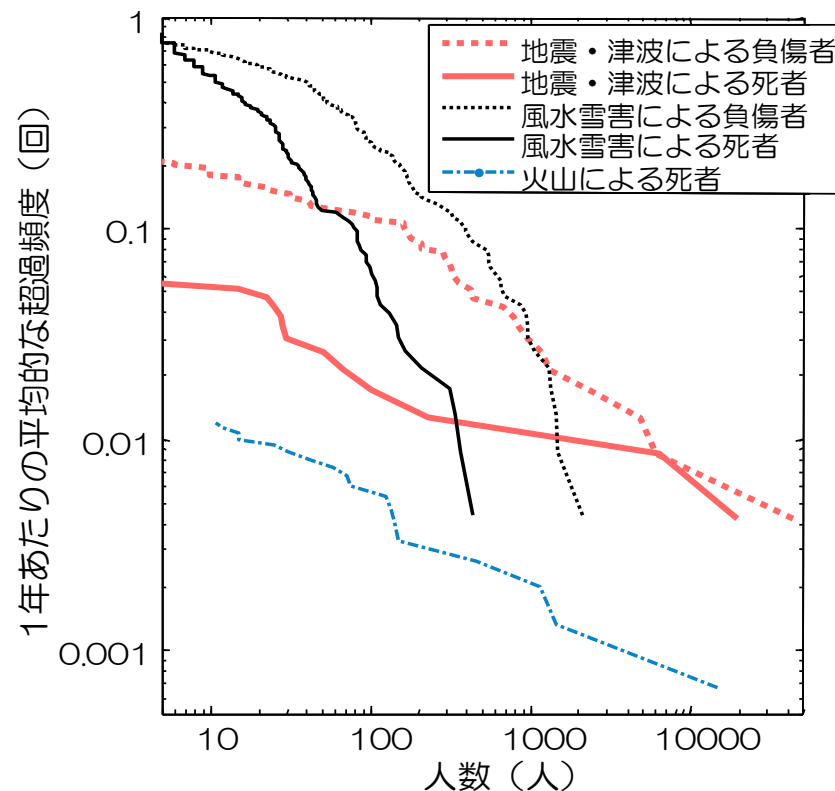
異なる事象を横並びに比較

✓風水害：死傷者数としては多い。一度に同時に大人数が影響を受けるような災害は発生しづらい

✓地震・津波災害：発生頻度自体はやや小さい。低頻度巨大災害が発生しやすい

✓火山災害：頻度は地震・津波の1/10程度ではあるが、同様の傾向

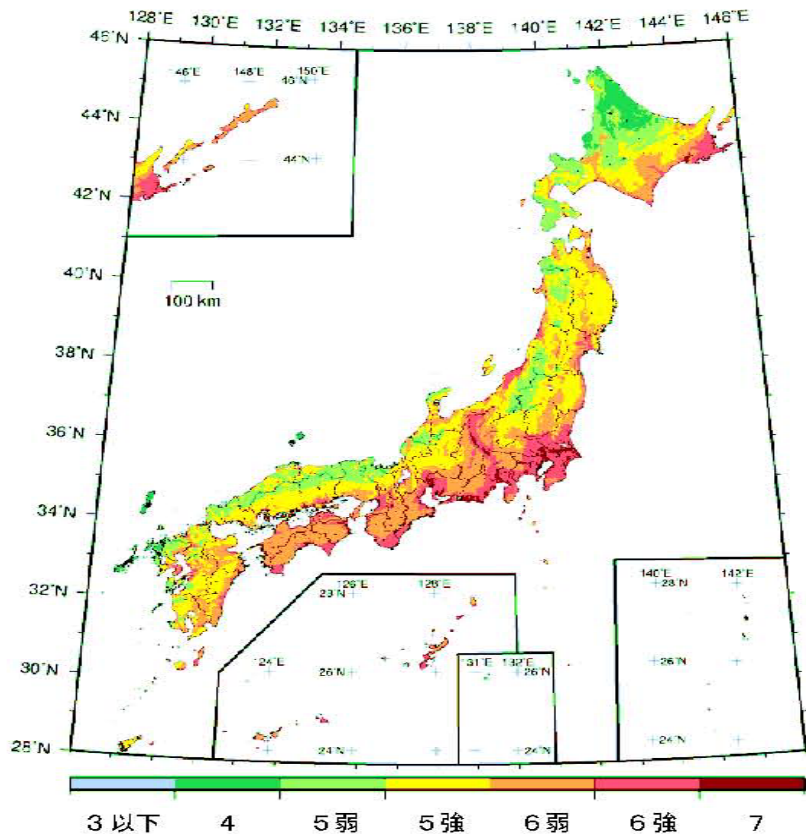
✓ただし、「評価対象の施設のリスク」、「今現在の状況」、「立地地域の特徴」は右の傾向とは異なる



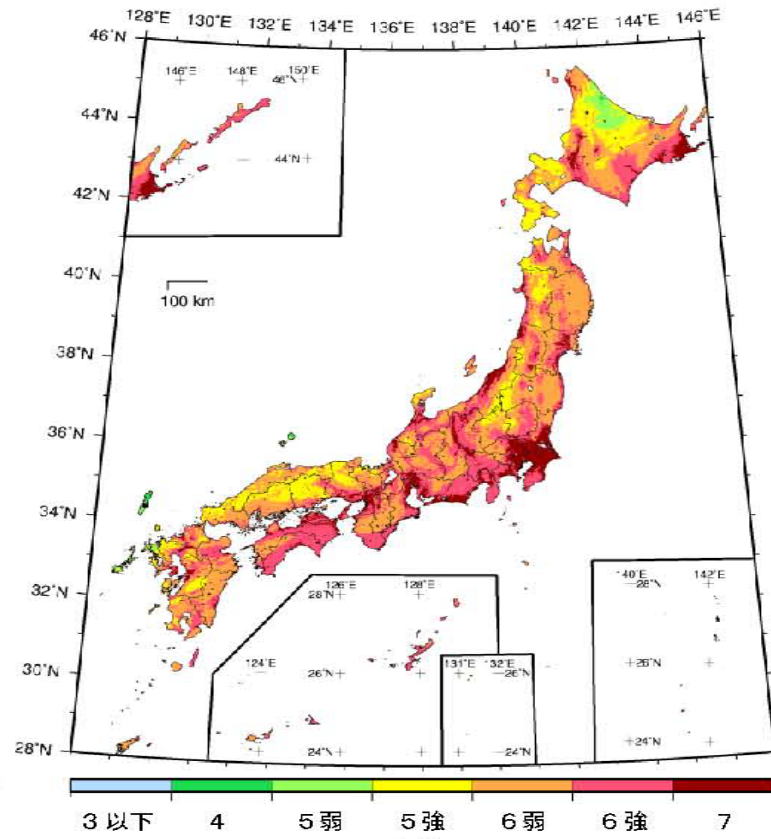
わが国の自然災害の死傷者数

地震・津波：理科年表 (1965年～2011年)
風水雪害：理科年表 (1965年～2010年)
火山：気象庁HP (1701年～2000年)

外的事象のリスク・ハザードの評価すること 見えること



(a) 年超過確率1/1,000
(30年超過確率3%)

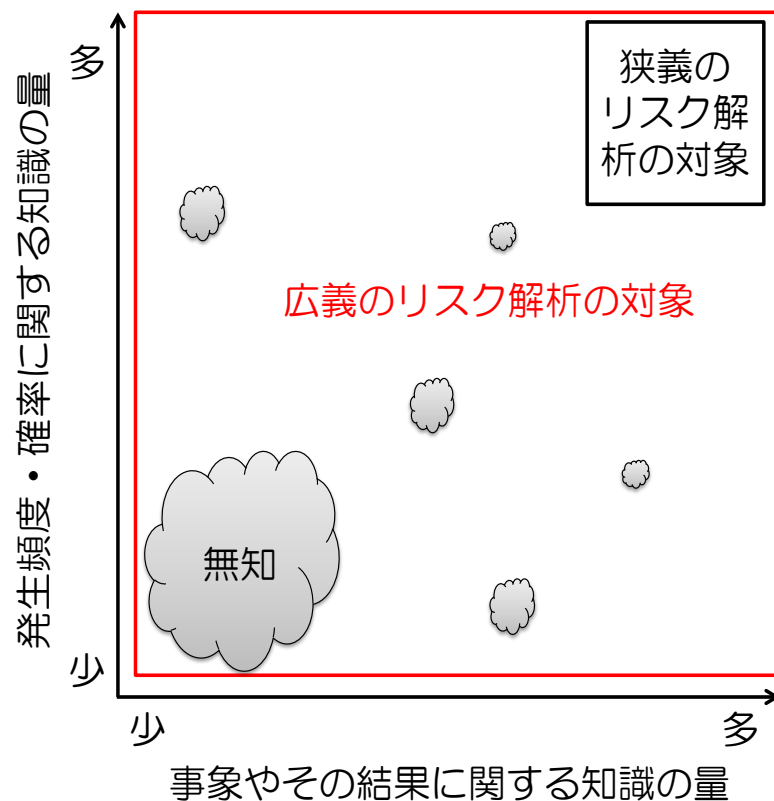


(b) 年超過確率1/10,000
(30年超過確率0.3%)

地震ハザードマップ (地震調査研究推進本部による) の例

外的事象に対するリスク評価における不確かさ

- 事故を発生させる程度に規模の大きい外的事象
 - ✓ 一般には低頻度の事象
 - ✓ 予測における不確かさが大きい
- 「影響・シナリオ」や「発生頻度（確率）」の知識が少ない（認識論的不確実さが大きい）事故もリスクの分析・評価の対象
 - 特に、多様なステークホルダが絡む場合、適切な取扱いが必要
 - 認識論的不確実さがどの程度についても評価し、意思決定の材料とする



外的事象の評価における不確かさの取扱い

- それぞれの専門家が表明する考え方に関わる不確かさ(考え方の違い)に関して、明示されているもの／されていないものも含め、可能な限り把握し、定量化し、議論することが必要
 - ✓ 外的事象の評価は、パラメータやモデルが異なれば容易に答えが変わりうる。これは特徴であって、(リスク評価上の)欠点ではない。
 - ✓ 不確かさは避けることが望ましいが、避けられないという前提に立ち、評価に取り込む
- どうすれば妥当な評価・対応とみなすことができるか？
 - ✓ 「十分な情報を有する技術者集団が妥当とみなせる、モデル化の選択肢、それらのモデル化が与える評価結果の分布と平均的傾向」を評価することが、対応が妥当とみなされるための必要条件
 - 個々の専門家からどのように情報を抽出するか？
 - それをどのように統合するか？
 - 明示されていない不確かさに対処するのに必要なプロセスは？
 - ✓ ただし、リソース（人員・予算）が必要

外的事象評価における不確かさの取り扱い

- 不確かさのため、運転期間中に、予測にかかわる知見が更新され、将来的に、現在とは異なる考え方・予測が出てくることが避けられない
 - ✓ 外的事象リスクは、新設時の設計の問題にとどまらず、運用や保全も含めた課題
 - ✓ 安全規制の基本的考え方は、知見の更新に対して可能な限り頑健なものであることが望ましい
 - ✓ 定期安全レビューのような最新の知見を明らかにし、それに基づく定期的な再評価と改善を行う枠組みが重要

外的事象評価における不確かさの取り扱い(続)

- その不確かさゆえに、着目する視点によってその判断が異なる場合も
 - ✓ごく一部の意見ではあったとしても異なる意見に対して敏感であることが必要
 - ✓更なる議論を招き、意思決定の妨げや遅れにつながる原因に
 - ✓完全性を求めるあまり不作為に陥らないことも重要で、時間的な観点も考慮した包括的で体系的な枠組み等、社会的・制度的な成熟
 - 例えば、運用中の再評価においては詳細な評価・検討に並行して暫定的な是正措置を実施するなど迅速に対応すること (agility) で不作為を避け、その上でその措置が十分であるか検討し、改善する枠組みなど

外的事象評価における不確かさの取り扱い

- 不確かさへの対処においては、単に外的事象の特徴のみが関係するものではなく、人的、組織的及び技術的要因が複雑に関係
- 人的及び組織的考慮事項を含めた体系的アプローチが必要
 - ✓ 「安全性向上評価制度」に代表される継続的安全性向上の仕組みが、事業者、規制機関、学会等の役割分担のもと、適切に機能することが極めて重要
 - ✓ 「複雑なものに対する対処」と「変化への対処」

安全研究が安全性向上に果たす役割

- 安全とは、研究や運転経験の評価等を通じて学習することではじめて発展する長期的なプロセスである（OECD/NEA, 2016）
 - ✓ 最新知見とは、安全研究や運転経験の評価から生み出すもの
 - ✓ 知見が継続的に更新される可能性がある等、上述した特徴を有する外的事象に対する原子力発電所の安全性を議論する際にも重要
- 安全研究における観点
 - ✓ 産業界、規制行政、推進行政、学术界（他学会も含む）の役割や協働の観点
 - ✓ 実プラントへの適用を含めた大規模な研究や基盤的な研究などの研究体制
 - ✓ 国際協調と国際的な研究への貢献と成果の取り込みなど
 - 短期的視点のみならず、中長期的な視点も含めた俯瞰的な視点からの議論と課題の提示が関係者間での目標と情報の共有、コミュニケーション、調整の観点からも重要

補足的な論点

外的事象に対する原子力発電所に対して求められる性能

- 「人と環境を放射線の有害な影響から防御すること」という原子力安全も目的からすると、
 - ✓ 外的事象の環境下においても、原子力発電所（施設）が、適切な水準のリスクに抑えられて（信頼性を有して）いなければならない
 - ✓ 対象となる外的事象は、頻度は小さいが規模が大きい事象
- 一方で、外的事象は、どのような規模のものが起きるのか明確な予測が困難な場合もあることを前提
 - ✓ 特に、上限レベルを定めるのが難しい場合や関連するデータが十分でない場合など
 - ✓ 上記の議論のみでは不十分で、様々な規模、発生頻度の外的事象を対象に必要な性能を議論することが必要

原子力発電所に要求される性能の例

- 原子炉を止める・冷やす・閉じ込めるという安全機能を維持すること（従来の外的事象に対する安全性の対象）
 - ✓ 規模の大きく比較的発生頻度が低い外的事象が対象、評価対象は安全上重要なSSC
- 上記の要求性能が満たされないような、外的事象が発生し得ることを考えて、そのような外的事象に対して、不釣合いに大きい結果を生じないようにすること
 - ✓ プラントとしてある程度の安全機能を有することを確認
 - ✓ 事故の影響低減に関わる機能を、事故発生防止と同等(以上)に重視
- 原子力発電所が運転され、その活動が生み出す社会的便益が継続して生み出されること
 - ✓ 中規模の比較的発生頻度の高い外的事象(設計基準程度以下)が対象。一般的には、原子力安全規制の対象外で、事業者が自ら考慮すべきもの（対象となるSSCは、安全上重要なものに限られない）
 - ✓ (大げさに言えば) 施設の正当性の問題

まとめ

- 外的事象に対して、原子力発電所に求められる性能とそれを達成するための枠組みについて、以下の観点から議論
 - ✓ 外的事象の定義と分類
 - ✓ 外的事象に対する深層防護の有効性
 - ✓ 不確かさに対する対処
 - ✓ 継続的安全性向上とリスク情報の活用
 - ✓ 従来の「安全性」以外に必要な性能
 - ✓ 安全に対する考え方と安全研究
 - ✓ 外的事象に対して要求される性能
- これらは、事業者における様々な取り組みの有効性さらには効果的な安全規制を議論する際に有効な観点になるものと考えられる