

## 原子力安全部会、標準委員会合同セッション

## 外的事象に対する包括的な安全確保の体系の現状と課題

## Comprehensive Framework for Safety against External Events -Current Situation and Challenges-

## (1) 外的事象に対する原子力安全の枠組み

## (1) Framework of Nuclear Safety against External Events

\*糸井 達哉<sup>1</sup><sup>1</sup> 東京大学

## 1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災における福島第一原子力発電所事故に見られるように、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、自然事象を含む外的事象が事故の主要な誘因であることを免れない。原子力安全部会では、外的事象への対策について、2015年秋の大会における原子力安全部会企画セッション等を通じて外的事象対策の安全確保の原則となる考え方とその具体化について議論を行ってきた<sup>1)</sup>。そこでは、原子力安全に影響を与える外的事象とそれに対する効果的な対策は地域ごとに異なること、そのため、外的事象に対する対策を検討する上では、原子力安全の枠組みに関する一般論に加えて、立地地域の状況に応じて事故の誘因となりうる外的事象を把握し、その外的事象の特徴に応じた具体的な対策が必要であること、さらに、外的事象、特に、地震等の自然事象に対する安全対策は、わが国が主導すべき部分が大きいと考えられることなどが議論された。本稿では、その後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現状と課題を提示することを目的とする。

## 2. 福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえた外的事象に対する原子力安全の考え方

2-1. 外的事象の定義と特徴<sup>1)</sup>

表1に外的事象の分類を示す。外的事象が原子力発電所に与える影響を評価する際には、例えば、地震と津波など複数の外的事象の同時又は連続的な発生に加えて、それに起因して火災等の内的事象が連続的に発生する可能性がある。つまり、原子力発電所に対するそれらの作用が重畳、つまり、複合的に影響する可能性がことを考慮する必要がある。その際には、複数ユニットが同時に影響を受ける可能性もある。以上から、外的事象が誘因で発生する事故は、複雑なシナリオとなりうることにその特徴がある。

表1 外的事象の分類<sup>1)</sup>

分類		例
外的事象	自然事象	地震（地震動・地盤変状等）、津波、洪水（高潮、河川氾濫等）、火山（火山灰、火砕流等）、強風・飛来物（台風、竜巻）、高温／低温、積雪、施設外火災（森林* <sup>1</sup> ）など
	人為事象	事故的航空機落下／意図的航空機衝突、施設外火災（航空機落下、森林* <sup>1</sup> 、工場）、サイバーテロなど
内的事象		施設内浸水（溢水）、施設内火災、タービンミサイルなど

\*<sup>1</sup> 森林火災は自然事象の場合と人為事象の場合がある

注：慣例的には、事故の発端となるプラント（発電システム）内部で発生する「ランダム故障」を「内的事象」と呼び、表に示す施設内で起こる事象を含む誘因事象全体を「外的事象」と呼ぶこともある。

## 2-2. 外的事象の評価における不確かさの取り扱い

特に、原子力発電所に事故を発生させる程度に規模の大きい外的事象は、一般には低頻度の事象であり、その予測における不確かさが大きいことに特徴がある。また、その不確かさのため、運転期間中に、予測にかかわる知見が更新され、将来的に、現在とは異なる予測がなされることが避けられない点もその特徴

といえる。このような特徴を踏まえると、外的事象に対する安全確保は、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である。そのため、安全規制が知見の更新に対して可能な限り頑健なものとする必要があることに加えて、規制の改正や定期安全レビューのような最新の知見を踏まえた定期的な再評価と改善を行う枠組みが重要である。

尚、外的事象に関わる設計や再評価の際の意思決定においては、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ような場合も考えられる。このことが更なる議論を招き、意思決定の妨げや遅れにつながる原因にもなりうる。このような状況下での規制判断も含めた意思決定においては、それが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である一方で、評価や検討の完全性を求めるあまり不作為に陥ることがないように、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) で不作為を避ける枠組みなど、時間的な観点も考慮した包括的で体系的な枠組みとそれに基づく取り扱いを行う社会的・制度的な成熟が求められる。

以上のように、外的事象の評価における不確かさに対処し安全性を保ち、さらに、向上させる枠組みは、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するものである。そのため、その不確かさへの対処においては、技術的な問題にとどまらず、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である。

## 2-3. 外的事象に対する深層防護

### (1) 深層防護と原子力発電所の設計

不確かさに対して原子力安全の目的を達成するために原子力発電所の設計と運用に適用される概念として、深層防護の考え方が重要とされてきた。IAEA の INSAG-10<sup>2)</sup>では、原子力発電所のプラント状態に対応した5つのレベルを定め、それぞれのレベルの目的および目的を達成するために不可欠な手段を定めている。福島第一原子力発電所事故を受けて、国際的に、深層防護の実現方法を強化する動きが見られる。特に、設計範囲の拡張が議論され、INSAG-10 の深層防護のレベル4に対応する設計として設計拡張状態 (Design Extension Conditions, DECs) の概念とその実現の方法が議論されている<sup>3),4)</sup>。そこでは、共通原因による設備の多重故障などが考慮され、そのような状態に対して事故の発生を防止し、また、事故の影響を緩和する方策が設計される。設計拡張状態に関わる要求は主に新設のプラントに対するものであるが、既設のプラントにも合理的に実現可能な範囲で適用されうるものである。

事故を発生させる程度に規模の大きい外的事象が発生する際には、原子力発電所内の構築物・系統・機器 (Structures, Systems and Components, SSCs) が同時に被害を受ける可能性が考えられる。つまり、外的事象という共通原因により、「異常・故障の発生防止」と「異常・故障の拡大防止、事故の制御」、「重大事故への対処」等に関わる SSCs が同時に機能喪失する可能性がある。さらに、事故への対処を行う人員や組織も同時に影響を受け、発電所敷地内のみでなく、敷地外においても被害が同時に発生して、事故時の対応に影響する可能性がある。これらは、設備のランダム故障を起因事象とする事故とは異なる特徴のひとつである。

IAEA の SF-1<sup>5)</sup>などにおいては、各レベルの防護の独立性が重要としているが、設計基準を超える外的事象の際には、上述のように、レベル間の完全な独立性は成立せず、深層防護の複数のレベルに同時に影響を与えるような共通原因故障が引き起こされる可能性がある。2015年秋の大会企画セッションとそれを受けたフォローアップセミナーでは、深層防護の各レベル間の独立性を合理的に実行可能な範囲で高めるための方策として、物理的分離と機能的隔離、多様性 (例えば、設備の位置的分散、可搬型 (モバイル) 設備の活用、地震に対する免震/制震等の導入) の導入等が、課題として議論された。関連して、外的事象に対するプラントの設計の考え方に関する課題も議論された。フランスに見られるように、設計基準の外的事象を超える状態を想定し、その場合に影響緩和設備が有効に機能するような対策を求められる場合もある一方、IAEA の SSG-30 など影響緩和機器の安全カテゴリーが低いままとする考え方があり、設計基準を超える状態に対する設備の設計の考え方の統一が必ずしもされていないことが、その課題のひとつであ

ると指摘されたり。

## (2) 外的事象に対する原子力発電所の設計

将来の発生予測が不確かな外的事象に対しては、不確かさの程度に応じて保守的に設計基準を設定することで、設計基準を下回る範囲で深層防護の有効性を確保することが基本である。しかし、それだけでは不十分であり、設計基準を超えるさまざまな規模の外的事象に対して合理的に達成可能な範囲で深層防護の有効性を確保するための備えを行う必要がある。大きな事故につながるような共通原因故障は、設計基準の想定が不十分、裕度が不十分、あるいは、深層防護のレベル間の独立性が不足している場合に引き起こされる<sup>6)</sup>。以下では、設計基準の設定と見直し、設計基準を超える外的事象に対する備えという2つの観点で、原子力発電所における外的事象に対する対処に必要な要素を議論する。

### a) 外的事象に対する設計基準の設定・見直し

上述のように、設計においては、保守的に適切な規模の外的事象を設計基準として想定することが前提となる。その際、確率論的ハザード評価結果に基づくか、あるいは、参照することでその妥当性を確保する。どの程度の規模の外的事象を設計基準として設定するかは、安全目標、および、原子力発電所全体、および、各々のSSCsに、どのレベルの機能維持を、どの程度の信頼性で要求するかに依存し、概ねハザードの超過頻度 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ /年（50年間での超過確率0.5%～0.05%に相当）が目安とされる。尚、その際に参照される確率論的ハザード評価においては、経験データが存在しない領域についての評価を行う必要があることから、評価プロセスの品質を確保することで評価結果の妥当性を確保し、それにより、専門的見地から正当化される解釈の中心と分布、幅を把握することが重要である<sup>7),8)</sup>。その際、評価上特に留意することが必要な要素として、事象の網羅性、包括的な不確かさの考慮、評価結果の適用可能範囲の明示、多面的な評価の実施、サイト固有の評価、国内外の経験や最新知見の反映などが考えられる<sup>9)</sup>。

### b) 設計基準を超える外的事象に対する備え

設計基準を超える規模の外的事象に対しては、上述のように、個々の設備による対応にとどまらず、物理的分離と機能的隔離、多様性を導入することで、設備の集合としての機能にも着目し、個々の設備の損傷が発生した場合においても、いずれかの設備が機能することで、効果を発揮させるという考え方が重要である<sup>1),10)</sup>。さらに、設計基準を大きく超え、設備のみでの対応が困難な状況を想定した備えの議論も必要である。この際、プラント内外の人や組織による事故対応が重要な役割を占める。このような備えは、サイトやプラントの状況に応じて様々な可能性が考えうる。それらの備えに対する考え方が有効であるかを判断するためには、保守的な仮定に基づく決定論的な評価と、定量的なリスク評価など多面的かつ相補的な評価を活用することが有効である。

## (3) 深層防護の議論に必要な論点

以上のように、原子力発電所の設計として深層防護を実装するアプローチが重要である一方で、適切なプラント設計や緊急時対応の備えのみで深層防護が実現できるものではないことに注意が必要である。例えば、最近、事業者や規制機関の安全文化、シビアアクシデントマネジメントの体制を含む人的・組織的要素が深層防護における各レベルの機能喪失の共通原因となりうるのかとの問題が改めて議論されるなど、深層防護を含む原子力安全について、人的・組織的要因も含めた体系的観点でとらえる議論<sup>9),11)</sup>が増えている。また、深層防護を含む安全に関する考え方やその実現の方法そのものについても、適宜見直すことが、定期安全レビューを含めた継続的な安全性向上の重要な論点のひとつであると言える。

## 2-4. 外的事象に対する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の役割

上述のように、外的事象により引きこされる事故は、複雑なシナリオとなりうることにその特徴がある。確率論的リスク評価（PRA）を含むリスク評価は、そのような事故を発生させるプロセスとその可能性、結果について、設計、運転、保全、外的事象等の異なる分野の知見を統合して評価するものである。また、

評価結果に基づき、事故の可能性を低減させる方策の効果が検討される。福島第一原子力発電所の教訓を踏まえると、外的事象については特に、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はもとより、台風や竜巻などの強風や火山噴火に伴う降下火砕物などその他の外的事象およびそれらの作用の重畳に対しても、その重要性に応じた精度で、包括的なリスク評価を行うことが重要であると考えられる。

また、国内外における運転経験や自然災害、人為災害等の経験を継続的な安全性向上の取り組みに活用することが重要であるが、その際には、リスク評価を活用して得られた知見と併せて洞察することで、事故の原因になる可能性がある事象を同定し、必要に応じた規制の改善や安全性向上対策実施の必要性を評価することが、重要な点であると考えられる<sup>12)</sup>。リスク評価を行うことは、日常の保全活動等において経験することのないこのような事故の発生に対する想像力をもつ上でも重要な役割を担う。

尚、リスク評価結果の活用においては、予測の不完全さや不確かさの程度を見極め活用することが重要であるとされる<sup>13)</sup>。一方で、不確かさがどの程度かを把握すること自体も、安全性向上のための重要な情報であると言える。また、前述のように、リスク評価の完全性を求めるあまり不作為に陥ることがないことも併せて重要である。

### 2-5. 安全研究が安全性向上に果たす役割

福島第一原子力発電所事故を踏まえて、原子力安全に対する考え方自体にも変化が見られる。文献<sup>12)</sup>では、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と定義される。そのうち、安全研究について考えると、福島第一原子力発電所事故をはじめとするこれまでの事故の教訓の反映や、事故の教訓に関連する安全研究は、長期間にわたる活動であり、それによりはじめて、事故からの真の教訓を得ることができると考える。このような安全に対する考え方は、新しい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となると考えられる。

安全研究の議論においては、産業界、規制行政、推進行政、学术界の役割や協働の観点、加えて、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様々な観点がある。また、外的事象に関わる安全研究では、上述のように、地震や津波などわが国において主要なリスク源であると考えられる事象はもとより、その他の外的事象まで広く対象とする必要がある。以上のように様々な観点が複雑に関連するため、取り組むべき技術課題について、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、調整の観点から重要である。

### 3. まとめ

外的事象に対する原子力安全の枠組みについて、外的事象の定義と分類、不確かさに対する対処、深層防護の有効性に影響を与える要素、原子力発電所における対処、継続的安全性向上とリスク情報の活用、安全研究の観点から議論した。これらは、事業者や安全規制における様々な取り組みの有効性を議論する際に有効な観点になるものと考えられる。

### 謝辞

本稿の一部は、日本地震工学会研究委員会において現在検討されている地震安全の基本的考え方に関する議論を参考に作成したものである。

**参考文献**

- 1) 糸井達哉、中村秀夫、中西宣博：多様な誘因事象に対する原子力安全の確保（その2）外的事象対策の原則と具体化，日本原子力学会誌，58(5)，pp. 318-323，2016.
- 2) IAEA: Defence in Depth in Nuclear Safety, A Report by the International Nuclear Safety Advisory Group, INSAG Series No. 10, 1996..
- 3) IAEA: Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety Requirements, IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1, 2012.
- 4) IAEA: Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety Requirements, IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 (Rev. 1), 2016.
- 5) IAEA, Fundamental Safety Principles, Safety Fundamentals, IAEA Safety Standards Series No. SF-1, 2006.
- 6) OECD/NEA: Implementation of Defence in Depth at Nuclear Power Plants: Lessons Learnt from the Fukushima Daiichi Accident, 2016.
- 7) U.S. NRC: Practical Implementation Guidelines for SSHAC Level 3 and 4 Hazard Studies, NUREG-2117, 2012.
- 8) 酒井俊朗：確率論的地震動ハザード評価の高度化に関する調査・研究，電力中央研究所調査報告，O15008，2016.
- 9) 糸井達哉、他：原子力安全確保における地震安全原則の必要性 (4) 地震安全原則と地震ハザード，日本地震工学会大会，2017.
- 10) 藤本滋、他：原子力安全確保における地震安全原則の必要性 (3) 地震安全基本原則と発電所システム性能，地震工学会大会，2017.
- 11) IAEA: Ensuring Robust National Nuclear Safety Systems – Institutional Strength in Depth, INSAG-27, 2017.
- 12) OECD/NEA: Five Years after the Fukushima Daiichi Accident Nuclear Safety Improvement and Lessons Learnt, Executive Summary, 2016.

---

\*Tatsuya Itoi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The University of Tokyo

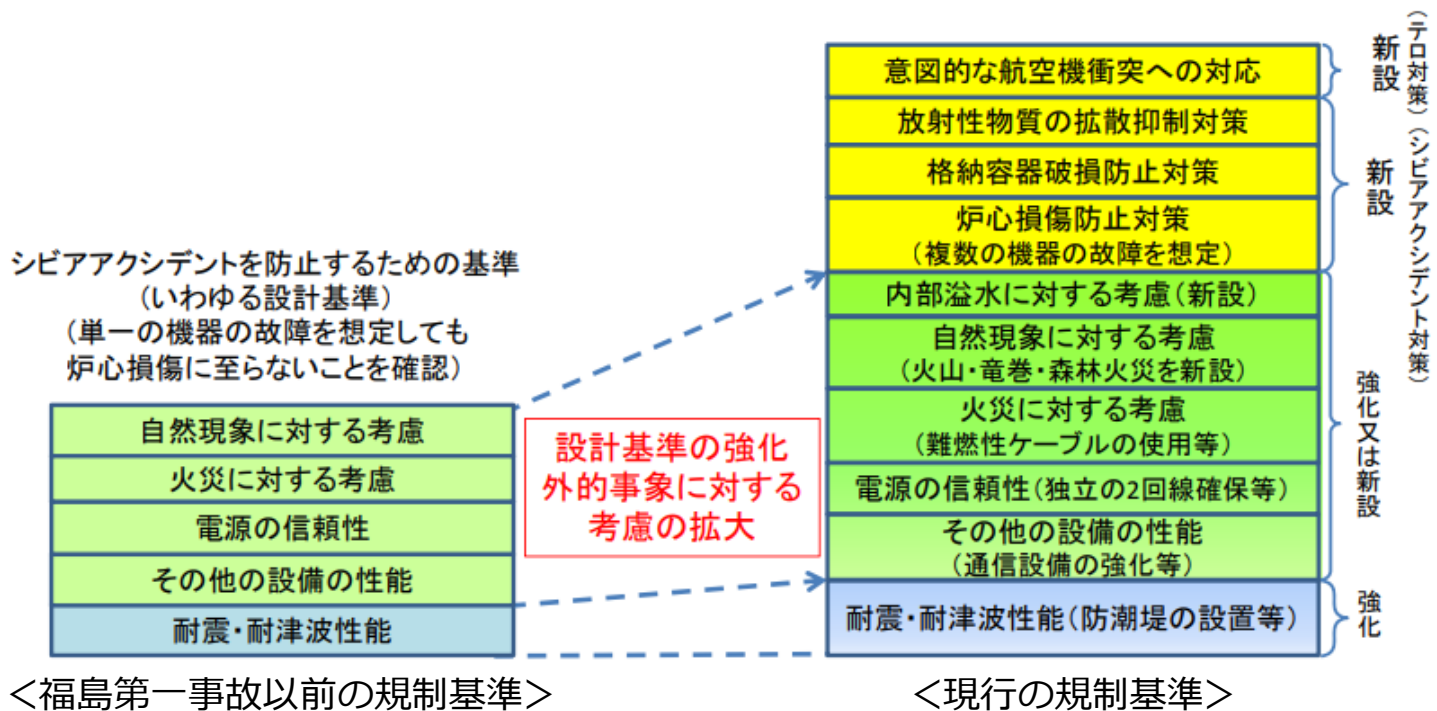
# 外的事象に対する包括的な安全確保の 体系の現状と課題

## (1) 外的事象に対する原子力安全の枠組み

糸井 達哉 (東京大学)

# 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
  - ✓ 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安全部会 におけるこれまでの主な議論

- 原子力安全に影響を与えうる外的事象とそれに対する効果的な対策は地域ごとに異なる
- 原子力安全の枠組みに関する一般論に加えて、立地地域の状況に応じて事故の誘因となりうる外的事象を把握し、その特徴に応じた具体的な対策が必要
- 外的事象、特に、地震等の自然事象に対する安全対策は、わが国が主導すべき部分が大きい
- 既に評価している外的事象に対するリスク評価の高度化だけでは不十分であり、いまだ評価が欠けている外的事象に対するリスクを評価し、対策を検討することも同様に重要である



# 本セッション（発表）の目的

- 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、自然事象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現状と課題を提示すること
  - ✓ 特に、多様な外的事象に対する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、安全研究の観点から議論

# 事故の誘因となる事象の分類

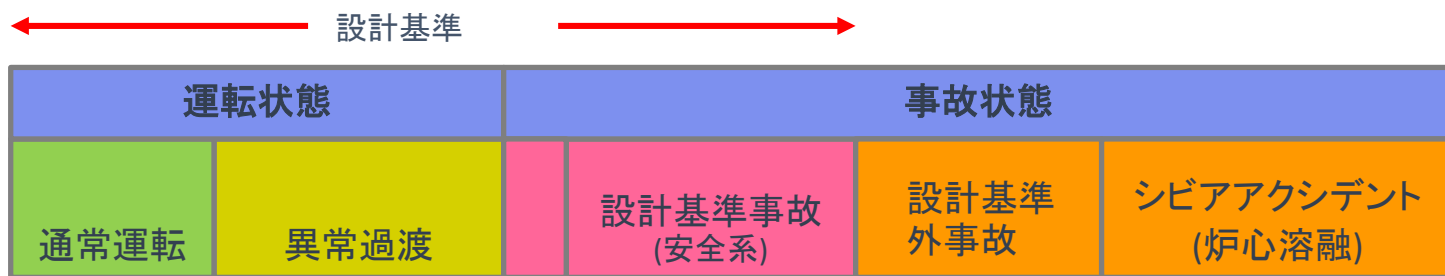
プラントの設備機器のランダム故障等	
外的事象（施設外で発生する事故の誘因となる事象）	自然事象
	地震（地震動、断層変位、地盤変状等）、津波、洪水、火山、強風（台風、竜巻）など
	人為事象
内的事象（施設内で発生する事故の誘因となる事象）	事故的航空機落下／意図的航空機落下、外的火災、サイバーテロなど
	施設内溢水(浸水)、施設内火災、タービンミサイルなど

□：本セッションでの対象（ただし、主に自然事象を取り扱う）

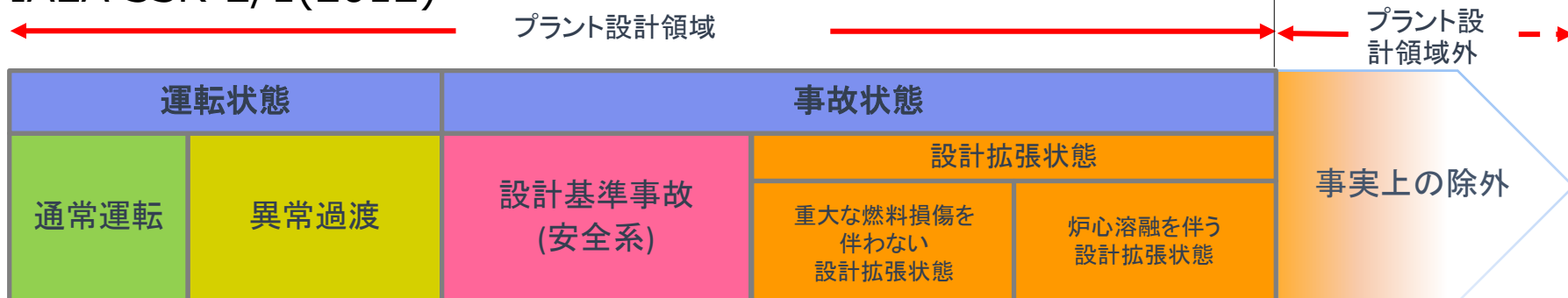
# (参考) 深層防護と(新設炉)設計の考え方の変遷

- 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)に対応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)



# 外的事象に対する深層防護の有効性

## <外的事象に対する原子力発電所における備え>

- 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依存し保守的に設定。概ねハザードの超過頻度 $10^{-4}$ ~ $10^{-5}$ /年（50年間での超過確率0.5%~0.05%に相当）が目安
- 設計基準を超える外的事象に対する備え
  - ✓ 物理的分離と機能的隔離、多様性の導入により、共通原因故障下においても、いずれかの設備が機能し効果を発揮するような備え（設計範囲の拡張）
    - リスク評価を含めた多面的かつ相補的な評価により妥当性を確認
  - ✓ 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）
  - 複数の外的事象の同時作用や、それに起因した火災や浸水の連続的発生

# 外的事象評価における不確かさの取り扱い

- 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
  - ✓ その予測における不確かさが大きい
- 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(まとめ)

- 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

# 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



# 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

# まとめ

- 外的事象に対する原子力安全の枠組みについて、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
  - ✓ 安全研究
- 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