

# 多様な誘因事象に対する 原子力安全の確保 (に関する試案)

糸井 達哉

東京大学大学院工学系研究科 准教授

# 本日の内容

- 原子力発電所事故の誘因となる事象の分類
- 自然現象の不確かさ
- 自然事象に対して原子力発電所が要求される性能
- 外的事象に対する深層防護
- 自然現象と原子力施設の立地
- リスク評価とリスク情報の活用

# 事故の誘因となる事象

# 事故の誘因となる事象

- 事故の誘因となる事象の分類の一例

プラントの設備機器のランダム故障等	
施設外で発生する事故を誘因する事象	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
	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
施設内で発生する事故を誘因する事象	施設内溢水(浸水)、施設内火災、タービンミサイルなど

# 自然事象の不確かさ

# 自然事象の一番の特徴は「不確実さ」

- 自然事象を含む事故を誘因する事象の予測には、本質的に不確実さを内在する
- 自然事象に対する安全の論理はその不確実さを前提とする必要がある

自然事象に対して原子  
力発電所が要求される  
性能

# 自然事象に対する原子力発電所の要求性能（一例）

- 施設の使用に供する期間に発生すると考えられる地震に対して、施設全体として適切な水準で社会的機能を確保すること
  - ✓ 「使用性」あるいは安定運転の確保に関する要求
- 施設の使用に供する期間に極めて稀ではあるが発生する恐れがある地震に対して、施設全体として適切な水準で安全上重要な機能が失われずに耐えること
  - ✓ 「安全性」あるいは安全確保に関する要求
- 想定しない規模の地震が発生したとしても、施設が深刻な損傷を受け大きな社会影響を与えないこと
  - ✓ 設計基準より大きい規模の地震に対する「堅牢性（ロバスト性）」の要求



# 自然事象に対する原子力発電所の要求性能（続）

- どの程度のレベルでこれらの性能を満たすことが「適切な水準」であるか？
- 自然科学等の最新知見を踏まえる
- 施設の特徴(事故時の影響も含む)を考慮
- 社会的な合意も踏まえて設定されるべき
  
- 原子力安全分野をはじめとする分野では、人命や環境に対する「安全目標」という形で議論がなされてきた経緯

# 自然事象に対する 深層防護

# 深層防護(Defense in Depth)

- 「不確実さ」に対して原子力安全を実現するために適用される概念
- IAEA INSAG-10ではプラント状態に対応した5つのレベルの防護
  - ✓レベル1：通常運転状態における異常発生  
の防止
  - ✓レベル2：異常過渡状態における事故への  
拡大防止
  - ✓レベル3：設計基準事故における事故の  
制御
  - ✓レベル4：設計拡張状態における影響緩和
  - ✓レベル5：オフサイトの緊急時対応

# 従来の自然事象に対する防護設計

- 様々なプラント状態を考える（通常運転状態、過渡状態、設計基準事故、設計拡張状態）。
- それらのプラント状態下において、最大級の自然事象の発生を仮定する。



- これらの条件の組み合わせの下で、安全上重要なSSCが機能を喪失しないことを確認する。

# 従来の自然事象に対する防護設計(続)

- 最大級の外的事象を想定
  - ✓ 「自然事象による事故のリスク」  
くく「ランダム故障による事故のリスク」
  - ✓ 設計基準となる自然事象下で「深層防護」が成立するよつにすることが「防護設計」
- 疑問
  - ✓ 自然事象ハザードの小さい地域を前提とした論理では？
  - ✓ 最大限の自然事象を想定した設計は現実的なのか？
  - ✓ わが国のような過酷な自然環境下等では、事故が発生するとすれば、自然現象が主な誘因であると考えるのが自然ではないか？

# 自然事象に対する「深層防護」の設計

- 自然事象に対する「設計」では、従来は以下のような考え方や体系に基づいてきた
  - ✓ 原子力発電所は、他の施設と比較して事故時の人と社会・環境への影響が大きい。
  - ✓ 最大限の地震を想定して、その条件下でも、原子炉が安全に停止する必要がある（発電所施設が被害を受ける状態を設計で許容しない）。
- 上記の考え方の重要性は変わらないが、そのうえで、以下の考えも含めるような、転換が必要であるようにも思われる
  - ✓ 様々な規模の外乱に対して、深層防護を実現する設計体系をどのように実現するか？
  - ✓ 重大な結果をもたらす事象の発生頻度を最も小さくするような設計(損傷制御設計)は可能か？<sup>14</sup>

# 外的事象に対する深層防護（1）

- 原子力発電所事故を発生させるくらいの規模の外的事象
  - ✓ 低頻度
  - ✓ 過去の経験が少ない



- ✓ 将来の発生可能性や発生時のシナリオ、結果の予測に不確かさ
- ✓ 不確かさを前提にして、どのように安全を確保するか？

# 外的事象に対する深層防護（2）

- 原子力発電所内の構築物・系統・機器 (SSCs: Structures, Systems and Components)が同時に被害を受ける
- 設計基準を超える規模の外的事象では
  - ✓ 事故の発端となる起因事象（例えば、冷却材喪失事故や外部電源喪失、過渡事象）
  - ✓ 影響緩和のための各種設備（例えば、非常用炉心冷却系、重大事故対処施設）の被害
    - 異常・故障の事故への拡大防止
    - 設計基準事故における事故の制御
    - 重大事故への対処



# 深層防護におけるレベル間の独立性

- IAEA SF-1（基本安全原則）では、各レベルの独立性が重要としている
- 上記の外的事象の特徴を考えれば、深層防護を支える設備機器の同時故障により、レベル間の完全な独立性は成立しえない。



- 外的事象に対して、実現可能な範囲でなるべく独立性を確保する実装に関する方法論が必要

# 独立性を確保するための手段

- 共通原因故障の可能性を十分考慮し、以下の考え方を適用する(IAEA 個別安全要件 SSR-2/1, Requirement 21)
  - ✓多様性
  - ✓冗長性
  - ✓物理的分離
  - ✓機能的独立 (機能的隔離)
- 安全系の物理的分離と独立性
  - ✓物理的分離、電氣的隔離、機能的独立、情報伝達(データ伝送)の独立性
  - 冗長化した安全系間の干渉を防ぐ

# 外的事象に対する安全系の独立性を実現する手段の例

□設計基準を超える規模の外的事象に対する共通原因の防止

- 機器の位置的分散
  - ✓物理的分離
  - ✓(設置位置の)多様性
- 可搬型(モバイル)設備の活用
  - ✓多様性
  - ✓機能的独立
- (地震に対する)免震／制震等の導入
  - ✓(振動特性の)多様性

# 設計基準を超える規模の外的事象に対する共通原因の防止

- 設計基準を超えるいくつかの状況を想定し、安全上重要な役割を果たすSSCsが有効に機能するように対策を用意
  - フランスにおける“Hardened Safety Core”の導入
  - 「多様性」や「物理的分離」などが成立しえない場合の考え方
- シビアアクシデント時等影響緩和のためのSSCsは、設計基準事故対応のSSCsより重要度が低いとする従来の考え方と必ずしも整合しない（例えば、IAEA SSG-30）

# 過度な深層防護にも弊害がある

- (例えば) いわゆる「前段否定」を旗印に、最も厳しい規模の事故を想定し、それに対する避難計画を立て、実行すると、逆に移動に伴う死者が発生するリスクが上昇する
- バランスのよい深層防護をどのように実現するか？
  - ✓ 厳しい自然現象を想定した防護設計との両立

# 原子力施設の立地 と自然現象

# 断層変位に対する考え方

- 地質学的、地球物理学的、地震学的データに基づき、以下の条件のうち一つ以上があてはまる場合には、断層の活動可能性があるとは判断する（IAEA NS-R-3）
  - ✓過去の活動の証拠がある
  - ✓周辺の活断層の活動に伴って活動が生じるような関係性が示される
  - ✓地震発生構造から考えられる最大規模の地震が断層変位を生じさせると考えられる
- 原子力施設の安全性に影響を与えるような、活動可能性がある断層が存在する証拠が場合には、代替サイトを検討しなければならない

# リスク評価と リスク情報の活用



# リスク情報活用の意義

- 完全な対策を講じたとしても、リスクをゼロであると証明することはできない。
- 最良の対策を講じたとしてもリスクをゼロにできない場合が多い。
- 確率論的リスク評価(PRA: Probabilistic Risk Assessment) は、残ってしまいうリスク（残存リスク）を系統的・定量的に分析する手法
  - ✓ 「事故の影響」、「起こりやすさ」、「時間余裕を含むシナリオ」、「支配的な要因」などの情報が、その「評価範囲」とともに得られる

# リスク情報活用の場合の例

- 停止時PRAを定期検査の管理に利用
- 停止時PRAを保全重要度の決定等への利用
  - ☞ 安全性向上と運転上の便益増加を両立
  - ☞ 保全中に自然事象等による事故が発生するリスクが顕著な点が諸外国と異なる
- 地震・津波PRAを事故に至る支配的な事故シーケンスの抽出に利用
  - ☞ 日々蓄積する自然事象とそれによる事故リスクに対する知見の更新（プラント固有／一般的知見）と意思決定の迅速性、定期的見直し

# バックフィットにおけるリスク情報活用

## • バックフィット

- ✓最新の知見を既存施設にも反映する規制とするために、既に許可を得た原子力施設に対しても最新の規制基準への適合を義務づける制度
- ✓将来的に、大きな投資を要求するような更なるバックフィットの必要性を議論する場面が来るはず。その際に、事故が起こる前に適切なタイミングで導入する必要があるが、一方で高い説明性・説得性が必要

## • バックフィットにおけるリスク情報の活用

- ✓「導入によるリスクの低減量」と「導入に必要なコスト」を比較する費用便益解析のようなツールによる、客観的・定量的な議論が可能に

まとめ

# 多様な誘因事象に対する原子力安全の確保のための論点の例

- 自然事象に代表されるような不確実な問題に対する安全性向上にかかる意思決定プロセスの枠組みとはどのようなものか？
- 自然現象等に対する深層防護をどのように実現するか？従来の枠組みからの転換は必要か？
- わが国のような過酷な自然環境下において、リスク情報はどのように活用できるのか、またどのように活用するのが適切か？また、どのような手順でそれを実現するか？