

# 地震・津波・航空機衝突対策 に関する規制基準

原子力規制委員会  
更田 豊志

平成27年9月11日

日本原子力学会「2015年 秋の大会」静岡大学静岡キャンパス  
原子力安全部会 企画セッション  
「外的事象対策の原則と具体化」

## AESJ 深層防護の考え方 (2014年5月)

### 解説4: 設計における外的事象への深層防護の適用

「... 自然現象については、あるレベルの防護策をとることで共通的に設備が故障することを防止し、残る偶発故障に対して内的事象の中で取り込んで考えるという整理がなされている。」 ➡ 発生防止に重点化

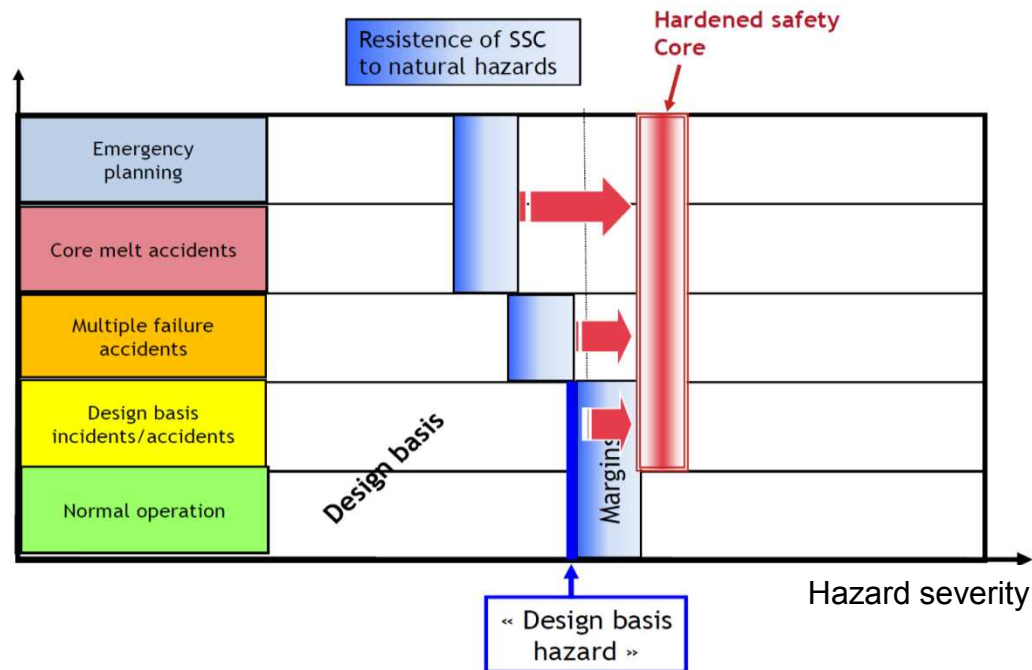
「設計基準の外的事象に対しては、国内外ともに深層防護の概念に基づき対策することになっているが、**設計基準を超える外的事象に対する具体的な取り組みを明確にしたものはこれまでには見受けられない。**」

「極端に発生頻度が低い、或いは予見することができないために、安全性を向上させるための対象として考慮されない事象は存在し続ける。(中略) そのような事象に対しては、定量的な発生頻度の評価結果ではなく、**防護策が無効になることを想定して対策を展開する、守るべきものから逆に辿って対策を展開する**などの安全性を高める取り組みが重要となる。」

➡ 特定重大事故等対処施設、“Hardened Safety Core”等

# 外的ハザードに対する深層防護の強化例 (仏のHardened Safety Core)

- ✓ 設計基準を上回るハザードに対処するための設計
- ✓ 安全上必須な機器に限定
- ✓ 主要な安全機能を事故発生後24時間確保
- ✓ 炉心損傷の発生防止と影響緩和の双方に対処
- ✓ 緊急時対応施設を含む



“Enhancement of Defence-in-Depth against External Events in French NPPs”, Jacques Repussard, OECD/NEA CNRA/CSNI Joint Workshop on Challenges and Enhancements to Defence-in-Depth in Light of the Fukushima Dai-ichi Accident, June 5, 2013

# フランスの取り組み

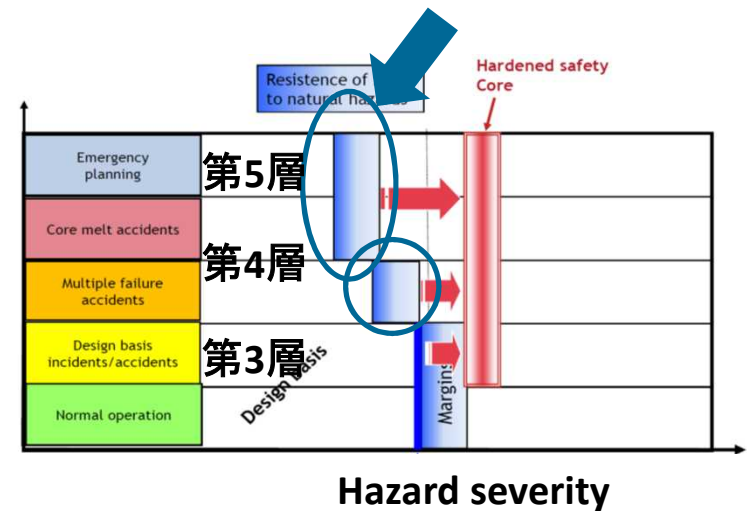
第4及び5層の堅牢性は第3層より低かった

- ✓ 当初設計では外的ハザードに対して**発生防止に重点化**(堤防、耐震等)主としてDBA対応機器を防護するという考え方
- ✓ 幾つかの自然事象をきっかけに**外的ハザードに対するDB要求を強化**  
高潮による溢水(1999)、氷雨による外電喪失(2005)、  
藻による最終ヒートシンク閉塞(2009)等
- ✓ ただし、深層防護の**各層に応じたSSCの堅牢性**は見直されなかった

“Enhancement of Defence-in-Depth against External Events in French NPPs”, 前出

例えば、格納容器ベント系(FCVS)は、一部を除き耐震設計がなされていないかった

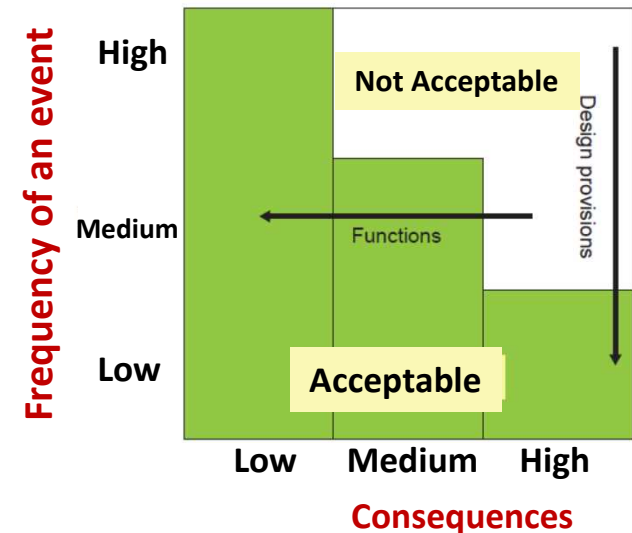
Status Report on Filtered Containment Venting, OECD NEA/CSNI/R(2014)7, July 2014



# DEC影響緩和機器の安全重要度 (IAEA)

- ✓ DBA(設計基準事故)対応機器の安全カテゴリーは1
- ✓ DEC(設計拡張状態)時の影響緩和機器の安全カテゴリーは2または3  
カテゴリー1機器のバックアップ機能を果たす機器の安全カテゴリーは2

機能	機能喪失時の深刻さ		
	高	中	低
過渡対応	1	2	3
DBA対応	<b>1</b>	2	3
DEC発生防止	2	3	3
DEC影響緩和	<b>2 or 3</b>	—	—



Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plans, IAEA Specific Safety Guide, SSG-30, 2014



# OECD/NEA 深層防護に関するワークショップ (2013年6月)

- ✓ 深層防護の考え方は今でも有効。但し、その強化が必要。
- ✓ 特に外的ハザードについては、深層防護の実行 (Implementation of DiD)のために更なる検討が必要。
- ✓ 調和のとれた実行を助ける更なるガイダンスが適切。
- ✓ 事故の発生防止のみならず、潜在的な事故が起きた場合の影響緩和にも改善の焦点をあてるべきである。

## 外的事象に対する深層防護

- ✓ 深層防護の考え方を原子力発電所の設計に適用する際、IAEAの安全基準では防護層をプラント状態と対応させている。第1層は通常運転状態(NO)、第2層は異常過渡状態(AOO)、第3層は事故(DBA)、第4層は設計拡張状態(DEC)での対策と定義。
- 津波について「①サイトに入れない(防潮堤等) ➡ ②建屋に入れない(水密性) ➡ ③機器の耐水性」も一般的な意味での深層防護。  
但し、上記の意味では①②③とも第1層での発生防止(Sub-layer)。これらに失敗するとAOO、さらにはDBA、DECに至る恐れがある。
- 例えば、多数の機器が浸水し機能喪失してDEC(第4層)に至り、さらに、そこでの拡大防止にも失敗すれば、炉心損傷に至る。(共通原因故障)
- ✓ 設計における4つの層の考え方は、ランダム事象と外的事象とで同じ。但し、**外的事象の場合は各層の対策に個々の事象の特徴に応じた頑健性(robustness)が求められる。**

## AESJ 地震安全の論理 (2010年7月)

- ✓ 基準地震動以下の地震動が発生した場合：  
B・Cクラス機器が機能喪失の可能性 → 異常過渡が起こり得る  
炉停止機器・ECCSはSクラス → 炉停止・冷却機能は確保  
→ 深層防護の考え方が成立する
- ✓ 基準地震動を超える地震動が発生した場合：  
耐震設計で基準地震動を超えることは未想定 → LOCAの発生可能性  
拡大防止・影響緩和機器もSクラス → 機能喪失の可能性  
→ 深層防護の考え方が成立しない
- ✓ 地震安全の論理構築：基準地震動を超える地震動に対して各防護  
レベル(事故の発生防止/拡大防止/影響緩和)をどのような考えに  
基づいて設計するか
- ✓ 地震PRAの活用：「確率論的な評価を用いてそのリスクが十分低いこと  
を示すことができれば、基準地震動を超えた領域においては、深層防護  
の成立性を必ずしも担保する必要がなくなるものと考えられる。」  
→ 「余裕があるから大丈夫」? . . . **議論の継続を**



## 福島第一原子力発電所事故の教訓

- ✓ 福島第一事故以前は、設計基準を超える外的ハザードを想定していなかった(設計の守備範囲外)。
- ✓ 津波については、第1層での「発生防止」の一部の対策(防波堤等)しか取られておらず、深層防護の考え方が適用されていなかった。
- ✓ 地震については、耐震重要度分類により基準地震動以下の地震に対しては深層防護の考え方が適用されていた。
- ✓ これらのことは福島第一原発事故以前から議論されてきたが、具体的な対策(モバイル機器の導入等)には至らなかった。
  - ➡ 「できる対策は迅速に(agility)」の重要性。

## 不完全さと不確実さ

- ✓ PRA の利用にあたっては、その
  - 不完全さ (incompleteness) と ● 不確実さ (uncertainty) の程度を見極め、その限界を把握した上で、可能かつ適切な活用を図る必要がある。
- ✓ 不確実さは敵ではなく、不確実さ評価の結果は「我々の知識のどこが不足しているか」を教えてくれる。  
不完全さは「どこに真のリスクが存在するか」に関する不確実さとも言える。但し、その大きさは評価できない。
- ✓ リスクの把握における不完全さと不確かさとが、重要な戦略としての深層防護を要求
  - ➡ 知識、データがより限られている低頻度高影響事象に対してこそ、深層防護はより重要な戦略

## 共通原因故障の回避

- ✓ 深層防護の設計への適用についての基本的な考え方は、内的ハザードでも外的ハザードでも同じ。ただし、外的ハザードでは、共通原因により、「発生防止」対策と「拡大防止、影響緩和」対策が同時に機能喪失する状況を回避する必要がある。
- ✓ 特に、設計基準を超える外的ハザードでは、事故状態(DBA)や設計拡張状態(DEC)に至る恐れがある。その各層での「拡大防止、影響緩和」対策の「信頼性」(機能維持という意味で「頑健性」と同義)の確保が重要。
  - 独立性 (特に、層間の独立性)    ● 物理的分離 (隔離)
  - 多様性機器の位置的分散、モバイル機器の活用、免震/制震等の導入など
- ✓ 設計基準を超えてどこまでのハザードを想定すべきかは、DECの定義や安全目標とも関連する困難な課題。IAEAでは、「事実上除外 (practical elimination)」について議論されている。➡ 継続的改善の必要性

## 事実上の除外 (practical elimination)

- ✓ IAEA安全要件SSR 2/1「原子力発電プラントの安全：設計」  
要件20：設計拡張状態(DEC)
  - 5.31. ...放射性物質の大規模または早期の放出に至り得るDECを事実上排除★しなければならない。
  - 事実上排除できないDECに対しては、公衆の防護のために必要な防護対策は、地域と時間の範囲が限定的であり、かつ、対策を行うに十分な時間を確保できるようにしなければならない。
    - ★：そのような状態が生じることが物理的に不可能な場合やそのような状態が発生しないことが高いレベルの信頼度で考えられる場合
- ✓ IAEAのTECDOC(ドラフト段階)では以下のような議論がなされている。
  - 新型炉の内的ハザードについては、大規模又は早期放出の発生頻度を $10^{-6}$ /炉年以下とすることができると期待されている。
  - 一方、ある種の外的ハザードに対しては、大規模/早期放出の発生頻度のしきい値として非常に低い値を採用することは一般的には現実的でない。

# IAEA/TECDOC(2015年5月ドラフト)

## 原子力発電所の設計に係る IAEA安全要求の適用に関する考慮

### 大規模または早期放出の防止のために必須な機器

- 設計基準を超える自然ハザードに対して適切な裕度を備えていなければならない (IAEA安全要件SSR 2/1)
- ✓ 設計基準を超える外的ハザードの発生頻度は非常に小さいが、一般的には大きな不確実さがある。従って、設計基準を超える荷重に対する機器のふるまいを理解することが重要 ➡ 安全裕度の定量的把握
- ✓ 種々の外的ハザードに対して確保されるべき裕度はハザードの特性に依存。クリフエッジ効果を引き起こす蓋然性とその評価における不確実さが重要
  - 共通原因故障を誘因する程度：  
外的事象の最も重要な特性。深層防護の複数の層を同時に脅かす。
- ✓ 地震のリスクが低または中程度の国(practice in low-to-medium seismicity countries)での実績では、設計基準を超える地震動の適切な評価として、設計基準の50%増を考慮 ➡ 合理的な根拠を見出すことは困難

## 新規制基準での地震への対応

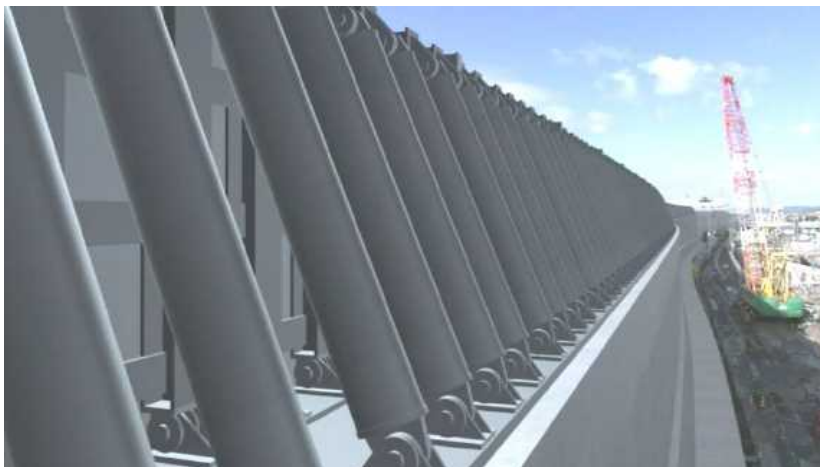
- ✓ より精密な「基準地震動」の策定
  - 将来活動する可能性のある断層等は、後期更新世以降(約12~13万年前以降)の活動が否定できないものとし、必要な場合は、中期更新世以降(約40万年前以降)まで遡って活動性を評価
  - 敷地の地下構造を三次元的に把握
- ✓ 多様性の要求を強化
  - モバイル機器の活用
  - 第39条(地震による損傷の防止)解釈:「特定重大事故等対処施設」  
・・・設計基準における措置とは性質の異なる対策(多様性)を講じること等により、基準地震動を一定程度超える地震動に対して頑健性を高めること。例えば、設計基準事故対処設備は剛構造であるのに対し、特定重大事故等対処施設に属する設備については、免震又は制震構造を有することをいう。
- ✓ 安全性向上評価
  - 地震PRA、津波PRA等

## 新規制基準での津波への対応

- ✓ 既往最大を上回るレベルの津波を「基準津波」として策定し、基準津波への対応として防潮堤等の津波防護施設等の設置を要求。
- ✓ 津波防護施設等は、地震により浸水防止機能等が喪失しないよう、原子炉圧力容器等と同じ耐震設計上最も高い「Sクラス」とする。

### <津波対策の例 (津波防護の多重化) >

○津波防護壁の設置  
(敷地内への浸水を防止)

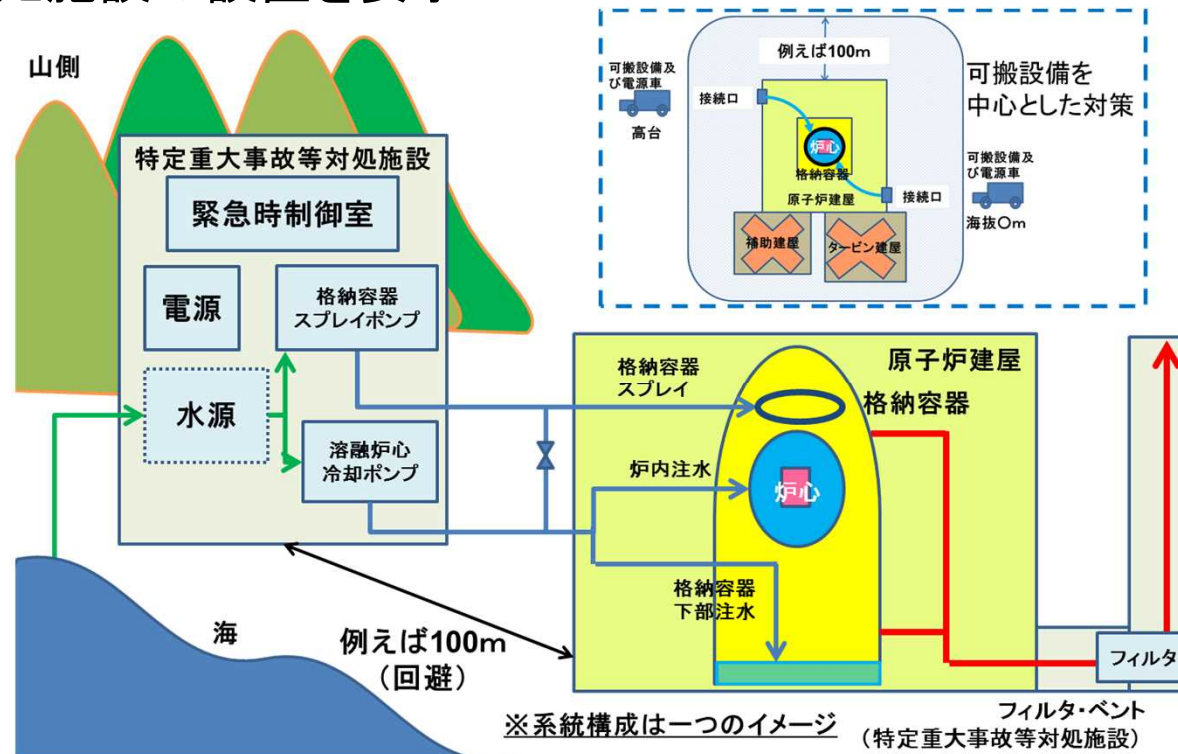


○防潮扉の設置  
(建屋内への浸水を防止)



# 新規制基準での航空機衝突への対応

- ✓ 偶発的な航空機落下に対しては、事故時に大きな影響をもたらす可能性のある施設について、「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率に対する評価基準」を適用
- ✓ 意図的な航空機落下については、これも事故時に大きな影響をもたらす可能性のある施設について、可搬式設備等による対応並びに特定重大事故対処施設の設置を要求





## まとめ

- ✓ 2007年7月16日に起きた中越沖地震を契機として日本原子力学会では同年12月以降、「地震安全の論理」について検討  
福島第一原発事故を受けた深層防護強化に関するOECD/NEAワークショップ(2013年6月)と同様な議論が既になされていた。  
議論が継続され、今後の安全性向上評価等に活かされることを期待。
- ✓ 柏崎刈羽での経験を踏まえ、福島第一でも免震重要棟が建設され、消火系への外部注水接続口も設置。  
➡「できることは直ぐやる」(Agility)の重要性
- ✓ 設計基準を超える津波の場合  
発生防止：建屋の水密性、機器の耐水性、機器の位置的分散等  
拡大防止/影響緩和：モバイル機器(高所保管)による対応等
- ✓ 地震は全ての機器に一律に荷重を与える。基準地震動を超える場合、LOCA+ECCS機能喪失の可能性。DEC対処設備は、基準地震動をある程度超える地震動に対して機能を維持できる必要がある。  
モバイル機器による対応、免震・制震等の導入  
地震PRAによる評価・確認(安全裕度の定量化、不確実さの評価)

## おわりに

- ✓ 地震、津波、航空機衝突のいずれもが、福島第一原子力発電所事故以前から「脅威として存在することは認識されているものの、その強度や発生確率について比較的大きな不確かさを伴うもの」として捉えられており、決して脅威としての存在が認識されていなかったわけではない。

しかしながら、その不確かさの大きさが、願望的な考え方を招いたり対策強化への決意を鈍らせたたりしてしまう。

原子力規制委員会はこれらの脅威への取り組みがその不確かさの大きさの故に後送りされることの無いよう、監視、検討を続ける。

- ✓ さらに、未知の未知(Unknown unknowns)については、事故・故障事例や他産業におけるものも含めた情報・経験の分析・研究に謙虚さをもってあたる必要があり、多様な分野の専門家を含めた幅広いコミュニケーションが必要となる。

原子力安全部会は、「安全の横串を通す機能を有する部会」(部会設立趣意書)として設立されており、分野間相互理解への貢献を期待する。