

原子力安全部会 夏期セミナー

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-

柏崎刈羽原子力発電所における外的事象に対する取り組み

Safety Countermeasures for External Events at Kashiwazaki-Kariwa NPS

石崎 泰央 東京電力

1. はじめに

- 福島第一原子力発電所事故は、東北地方太平洋沖地震とこれに伴う津波が誘因
- 当事者として、その主原因である津波対策を事前にとれなかったことを痛切に反省
- 外的事象特有の共通要因により過酷事故となった
(地震により外部電源を喪失し、津波により全電源を喪失)
- 加えて、津波による瓦礫等により復旧作業も困難を極め、被害の拡大を抑制できず
- 柏崎刈羽原子力発電所では、福島第一事故の教訓を踏まえ事故直後から対策
(防潮堤、注水のための可搬設備等)
- 新規制基準への適合性審査を通じて、外的事象からの防護を含む安全対策を改善

2. 原子力安全確保体系における福島第一事故の位置づけ

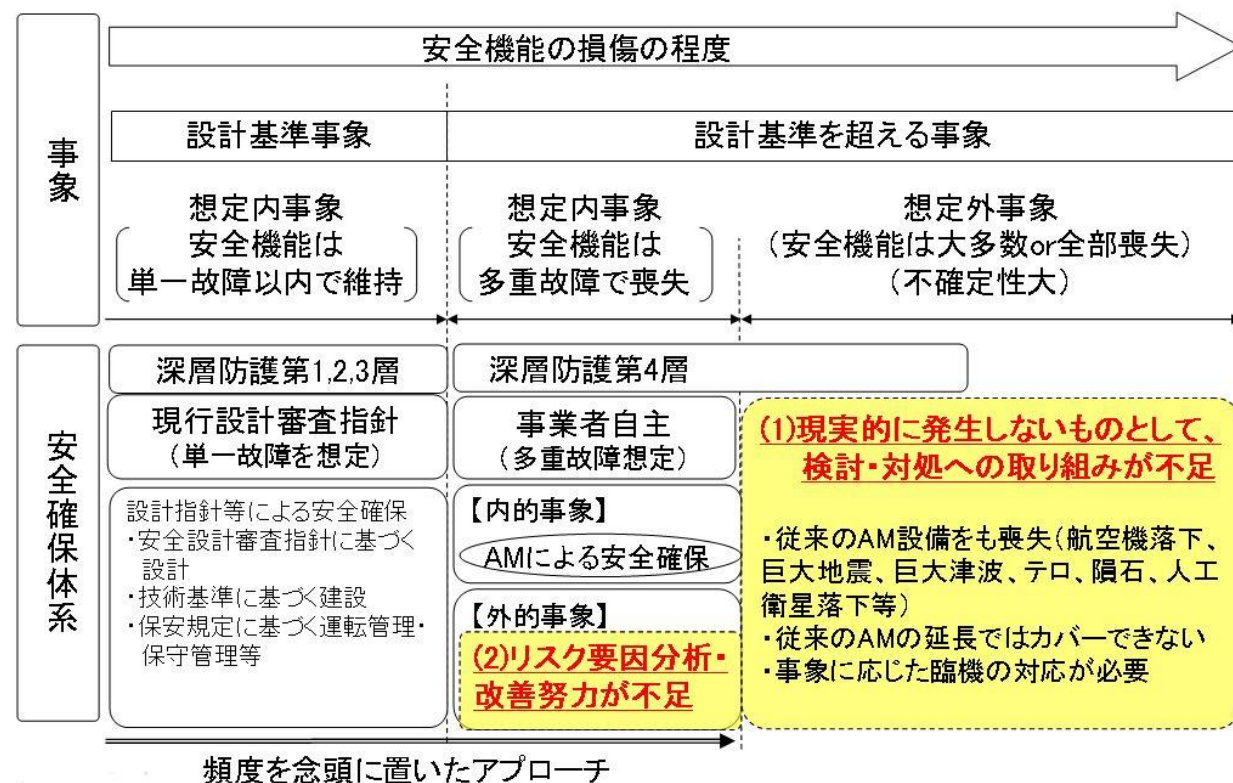
【従来の取り組み】

- 福島第一原子力発電所事故以前は、深層防護の第三層までを設計基準事象でカバー（単一故障の想定を踏まえた決定論的な評価）
- 設計基準事象を超える領域は、事業者自主のアクシデントマネジメント(AM)（PRA活用も、内の事象が対象）

【教訓】

- 外的事象に対する分析不足
- 想定を超える事態への具体的な対応が不足

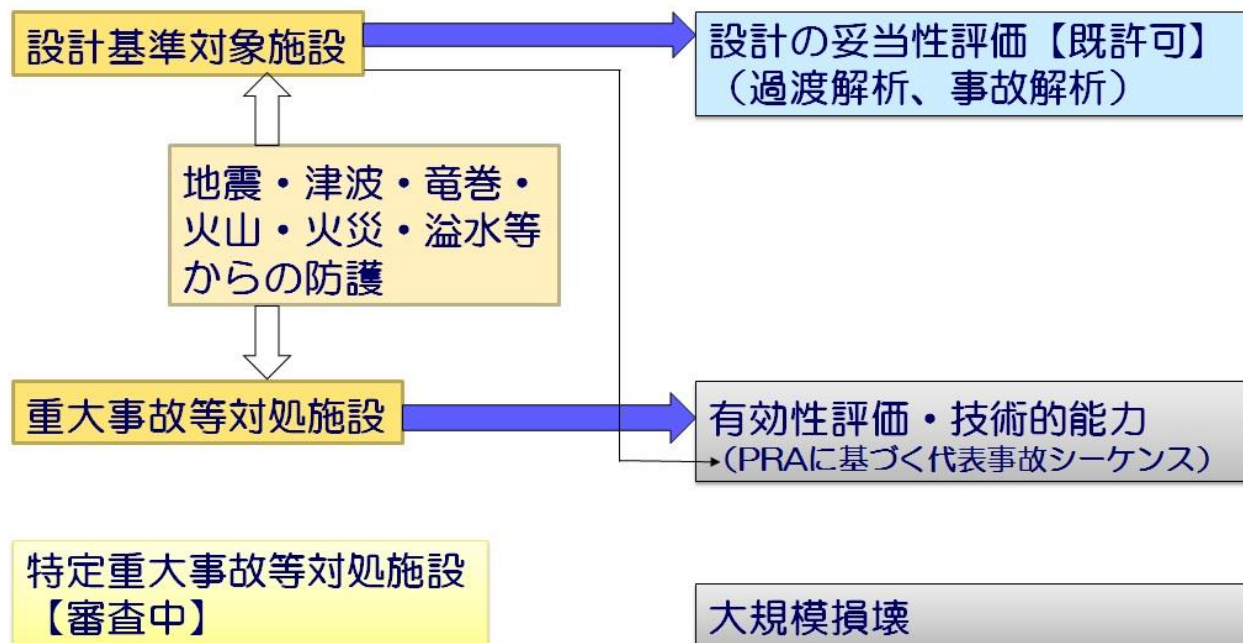
従来の安全確保体系からみた福島事故の原因分析



3. 新規制基準を踏まえた安全対策の全体像

- 従来からある設計基準対象施設（DB設備）を、従来より厳しい自然現象や人為事象に対し防護
- DB設備が故障した場合に想定される炉心損傷シーケンス（PRAにより抽出）を重大事故等対処施設（SA設備）で回避できることを確認（有効性評価）。
- 内外の知見を駆使しても炉心損傷を防止できない場合には、格納容器の破損防止ができることを確認、あるいは有意な影響をもたらすことは考え難いシナリオであることを確認
- 深層防護の観点から、大規模損壊を考慮し、体制や手順書等の適切性を確認
- 設計基準を超える領域に対しても、設計基準とは異質のロバスト性を確保（分散配置、機動的対応、人的パフォーマンスの活用）

設置変更許可申請の全体像



4. 外的事象に対する設計基準の想定（スクリーニング／規模）

- 立地点の特徴、ヨーロッパのストレステスト、IAEAの基準などを踏まえ抽出
→ 42の自然現象と19の人為事象
- 一次スクリーニング → 詳細評価対象
 - 9つの自然現象（風（台風）、竜巻、低温（凍結）、降水、積雪、落雷、地滑り、火山、生物学的事象）
 - 5つの人為事象（火災・爆発、有毒ガス、船舶の衝突、電磁的障害、内部溢水）
- 自然現象の規模は、以下の中で厳しい値
 - ① 既存の規格基準
 - ② 過去のデータ
 - ③ 年超過確率 10^{-4} に相当する規模

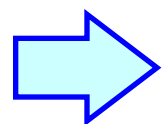
【一次スクリーニング基準】

- A) 影響が及ぶほど発電所近傍では発生しない
- B) 現象の進展が遅く、そのリスクが事前に検知または予測できる
- C) 安全設備等への影響の程度が、設計で考慮している程度に包含される
- D) 影響が他の自然現象で代表できる

自然現象	設計基準値	根拠
風	40.1 m/s	②観測記録
竜巻	92 m/s	③ 10^{-6} 値＋裕度
低温	-15.2 °C (24時間継続)	③ 10^{-4} 値
降水	101 mm/h	③ 10^{-4} 値
積雪	167 cm	③ 10^{-4} 値
落雷	200 kA	③ 10^{-4} 値
火山	35 cm	②文献等
地すべり	影響なし	個別評価

4. 外的事象に対する設計基準の想定（規模）

年超過確率評価に基づき設計基準を設定する際、年超過確率“ 10^{-4} ／年に相当する値”を参照



10^{-4} ／年程度のハザードに対し、大きな安全裕度を持つ適切な設計（耐力、多重性・多様性など）を講じることで、新規制基準において示されている**安全目標（ $<10^{-4}$ ／年）**に見合う**安全性が確保される**。

- 地震 設計基準地震動は年超過確率 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ／年相当
- 津波 設計基準津波は年超過確率 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ／年相当
- 運転時の異常な過渡変化 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ ／年相当 ， 事故 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ ／年相当
『発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針』における
 運転時の異常な過渡変化：原子炉施設の寿命期間中に予想される事象
 事故：原子炉施設の寿命期間中にまれではあるが原子炉施設の安全性を評価する観点から想定する必要のある事象
- 諸外国のその他自然現象基準：年超過確率 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ ／年
 （概ね年超過確率 10^{-4} ／年）

※ 竜巻は発生事例が少なく、不確定性が大きいいため、設計基準として年超過確率 10^{-5} ／年を採用。

※ 火山は噴火の頻度や火山灰の堆積厚さなど、確率評価が困難なため年超過確率は設計基準として不採用。

4. 外的事象に対する設計基準の想定（人為事象／自然現象の重畳）

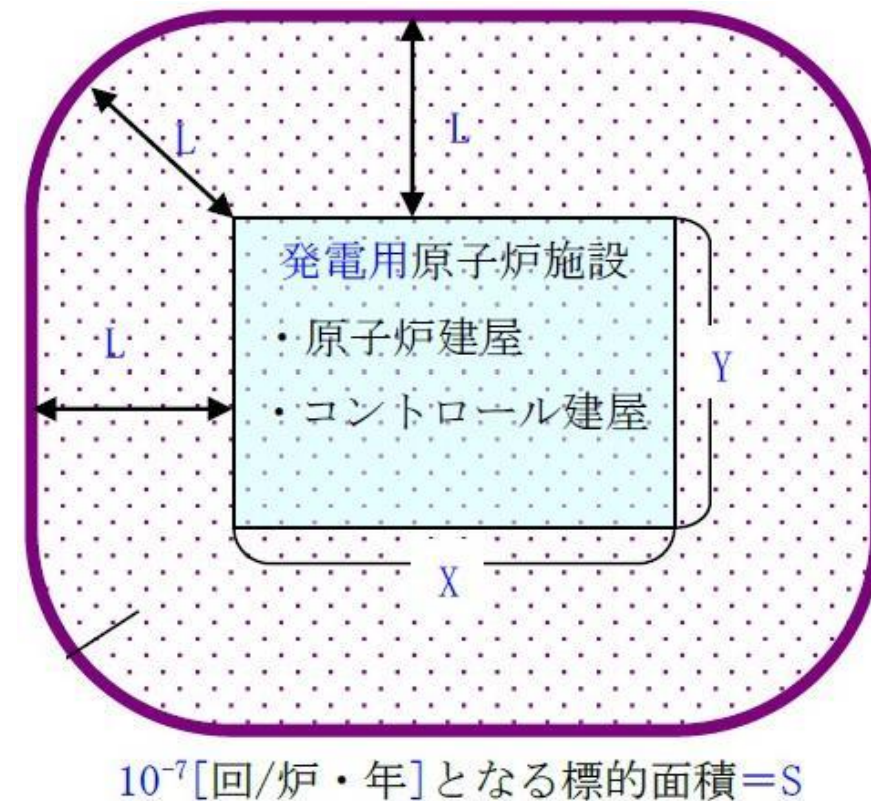
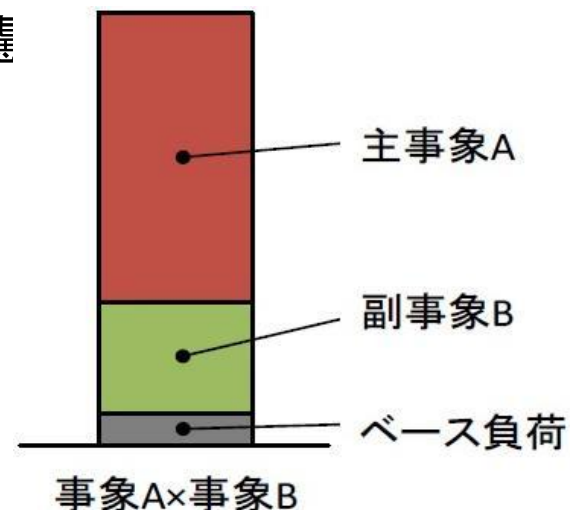
- 人為事象の規模：敷地内外に存在し得る最大のハザード
（航空機落下は年超過確率 10^{-7} を踏まえた評価）

- 外的事象の重畳

発生頻度の高い事象はベース負荷で考慮

主事象A：設計基準事象相当

副事象B：年超過確率 10^{-2} 相当



←航空機落下時の影響を
評価するために考慮が必要
な施設の例

- 荷重の大きさ等の観点で代表性のある、地震、積雪、火山の組み合わせに対して個別に影響評価

4. 外的事象に対する設計基準の想定（自然現象の重畳モード①）

■組み合わせの考え方（損傷・機能喪失モード）

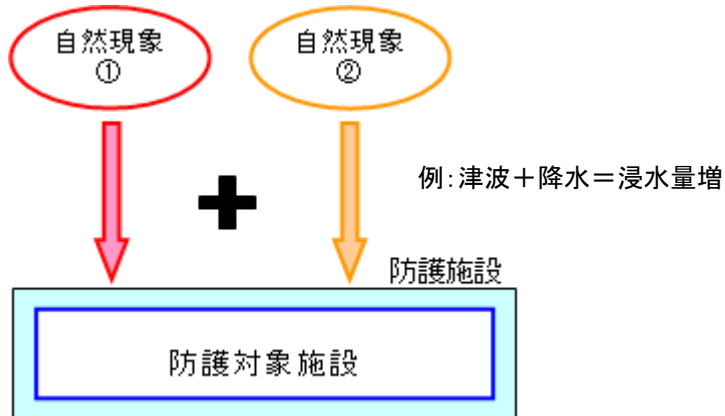
- 各自然現象が原子炉施設へ作用する影響モードを検討
例 堆積：積雪、火山灰 浸水：津波、降水 閉塞：台風、竜巻 等
- 影響モードの組み合わせ方により、単独の自然現象よりも影響が増長するケースの有無を確認

■重畳により影響が増長するケース

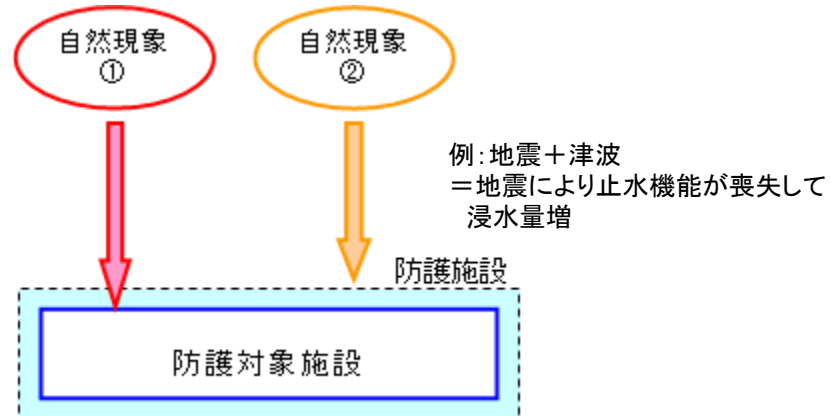
- I. 各自然現象から同じ影響がそれぞれ作用し、重ね合わさって増長するケース
- II. ある自然現象の防護施設が他の自然現象によって機能喪失することにより、影響が増長するケース
- III-1. 他の自然現象の作用により前提条件が変化し、影響が増長するケース
- III-2. 他の自然現象の作用により影響が及ぶようになるケース

4. 外的事象に対する設計基準の想定（自然現象の重畳モード②）

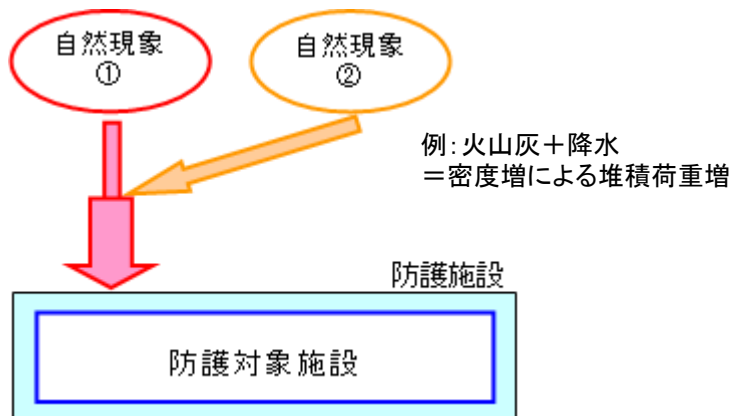
I. 各自然現象から同じ影響がそれぞれ作用し、重ね合わさって増長するケース



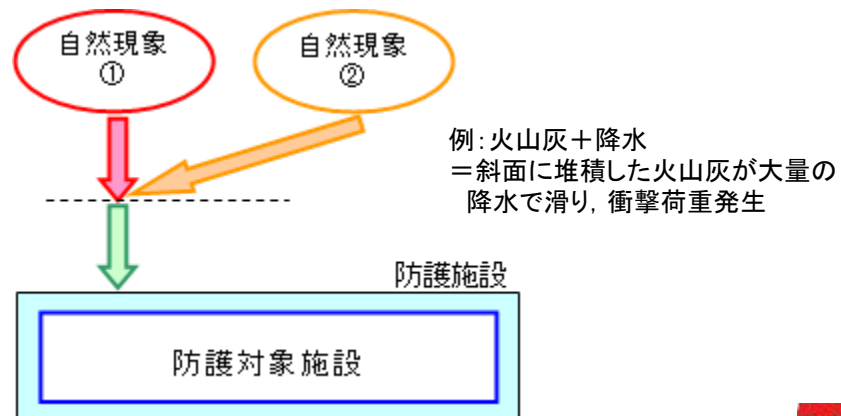
II. ある自然現象の防護施設が他の自然現象によって機能喪失することにより、影響が増長するケース



III-1. 他の自然現象の作用により前提条件が変化し、影響が増長するケース



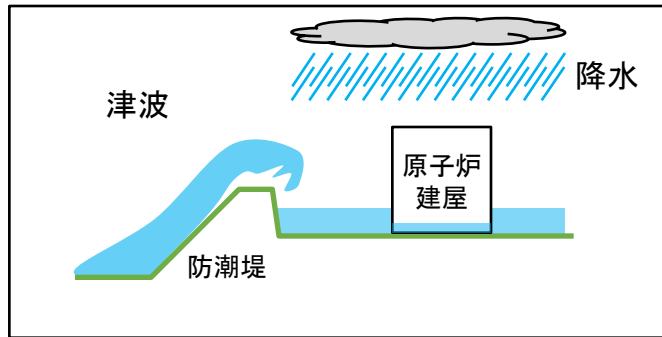
III-2. 他の自然現象の作用により影響が及ぶようになるケース



4. 外的事象に対する設計基準の想定（自然現象の重畳モード③）

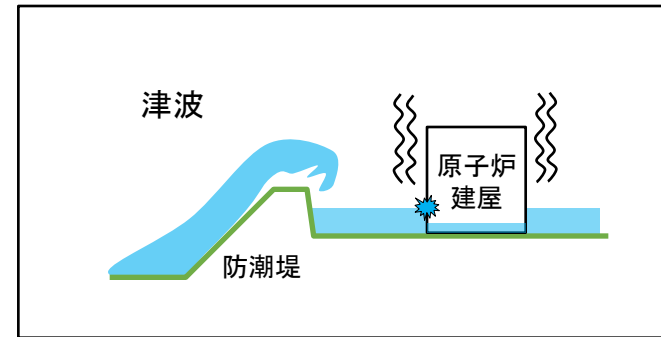
I. 各自然現象から同じ影響がそれぞれ作用し、重ね合わさって増長するケース

【例】津波(主) + 降水(副) = 浸水量 増加



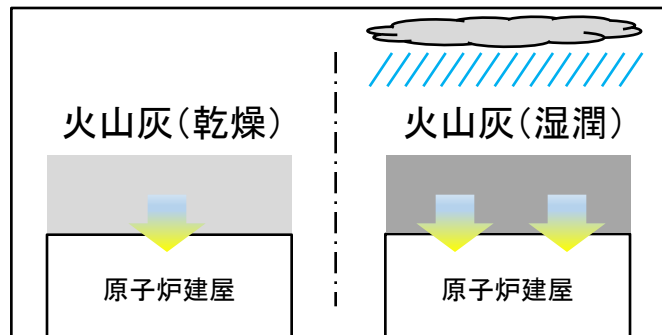
II. ある自然現象の防護施設が他の自然現象によって機能喪失することにより、影響が増長するケース

【例】地震(主) + 津波(副) = 地震により止水機能喪失 → 浸水量 増加



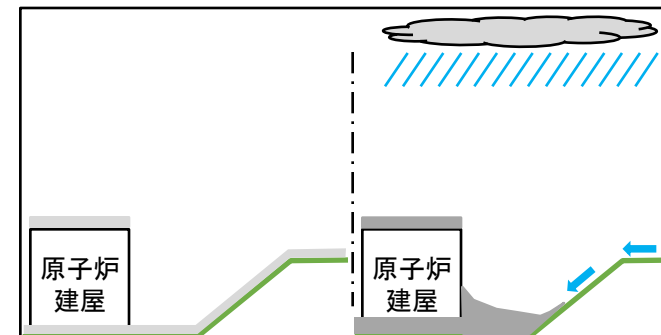
III-1. 他の自然現象の作用により前提条件が変化し、影響が増長するケース

【例】火山灰(主) + 降水(副) = 密度増による堆積荷重増加



III-2. 他の自然現象の作用により影響が及ぶようになるケース

【例】火山灰(主) + 降水(副) = 斜面に堆積した火山灰が大量の降水で滑り、衝撃荷重発生



4. 外的事象に対する設計基準の想定（自然現象の重畳モード④）

■ 組み合わせる事象のレベル

➤ 完全に独立に発生する事象同士の重畳

主事象： 10^{-4} 回/炉・年（設計基準レベル）

副事象： 10^{-2} 回/炉・年（プラント寿命中の発生を想定するレベル）

例 地震と積雪 等

➤ 発生する相関性が高い事象同士の重畳

主事象： 10^{-4} 回/炉・年（設計基準レベル）

副事象： 10^{-4} 回/炉・年（設計基準レベル）

例 竜巻と落雷 等

4. 外的事象に対する設計基準の想定（自然現象の重畳モード⑤）

■ 自然現象の組み合わせ

【独立事象同士】

主事象: 10^{-4} 回/炉・年 (相当)

副事象: 10^{-2} 回/炉・年 (相当)

【相関性が高い事象同士】

主事象: 10^{-4} 回/炉・年 (相当)

副事象: 10^{-4} 回/炉・年 (相当)

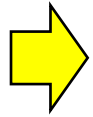
主事象		副事象		i		ii			I			
				地震		津波			降水			
重畳事象		損傷・機能喪失モード		①荷重(地震荷重)		①浸水	②荷重(衝突)襲来物・波力	③浮力	④閉塞(取水)襲来物・海底砂移動	⑤冷却機能低下:海水系	①浸水	②荷重(堆積)
自然現象		損傷・機能喪失モード		備考								
i	地震	①荷重(地震荷重)				-	II	I	-	III-1	II	II
ii	津波	①浸水				-	-	-	-	-	I	-
		②荷重(衝突)襲来物・波力				I	-	-	-	-	-	-
		③浮力				III-1	-	-	-	-	-	-
		④閉塞(取水)襲来物・海底砂移動				-	-	-	-	-	-	-
		⑤冷却機能低下:海水系				-	-	-	-	-	-	-
1	降水	①浸水				-	I	-	I	-	-	
		②荷重(堆積)				II, III-1	-	-	-	-	-	
2	積雪	①荷重(堆積)				III-1	-	-	-	-	II	I, II
		②相間短絡				-	-	-	-	-	-	
		③閉塞(空調)				-	-	-	-	-	-	
3	雪崩	①荷重(衝突)				I	-	I	-	-	I, II	-
4	ひょう, あられ	①荷重(衝突)				I	-	I	-	-	-	-
5	氷嵐, 雨氷, みぞれ	①荷重(堆積)				III-1	-	-	-	-	II	I, II
		②閉塞(空調)				-	-	-	-	-	-	-
6	氷晶	①荷重(堆積)				III-1	-	-	-	-	II	I, II
		②閉塞(空調)				-	-	-	-	-	-	-
7	霜, 霜柱	①-				-	-	-	-	-	-	
8	結氷板, 海水, 氷壁	①閉塞(取水)				-	-	-	-	-	-	
9	風(台風含む)	①荷重(風圧)				I	-	I	-	-	-	-
		②閉塞(取水)				-	-	-	-	I	-	-
10	竜巻	①荷重(風圧)				I	-	I	-	-	-	-
		②荷重(気圧差)				I	-	I	I	-	-	I
		③荷重(衝突)				I	-	I	-	-	-	-
		④閉塞(取水)				-	-	-	-	I	II	-
11	砂嵐	①閉塞(空調)				-	-	-	-	-	-	

- I. 各自然現象から同じ影響がそれぞれ作用し、重ね合わさって増長するケース
- II. ある自然現象の防護施設が他の自然現象によって機能喪失することにより、影響が増長するケース
- III-1. 他の自然現象の作用により前提条件が変化し、影響が増長するケース
- III-2. 他の自然現象の作用により影響が及ぶようになるケース

4. 外的事象に対する設計基準の想定（自然現象の重畳モード⑥）

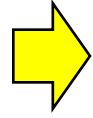
I. 各自然現象から同じ影響がそれぞれ作用し、重ね合わさって増長するケース

【独立】 **津波(主)** + **降水(副)** = 浸水量 増加



設計基準の津波ではプラント設置地点まで到達せず。降水との重畳により影響が増長することはない。

【独立】 **火山灰(主)** + **積雪(副)** = 堆積荷重 増加



設計基準の火山灰35cmに加え、 10^{-2} /年程度の積雪84cmが重畳した場合において建屋等の健全性を確認。除灰・除雪を行い影響を軽減させる。

Ⅲ-1. 他の自然現象の作用により前提条件が変化し、影響が増長するケース

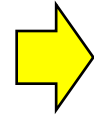
【独立】 **火山灰(主)** + **降水(副)** = 密度増→荷重増加



設計基準の火山灰35cmの密度を乾燥状態から湿潤状態に増加させ、建屋等の健全性を確認。除灰を行い影響を軽減させる。

Ⅱ. ある自然現象の防護施設が他の自然現象によって機能喪失することにより、影響が増長するケース

【相関】 **地震(主)** + **津波(副)** = 止水機能喪失→浸水量 増加



設計基準の地震では止水箇所は機能を維持できる設計であることを確認。設計基準の津波ではプラント設置地点まで到達せず。地震と津波の重畳により影響が増長することはない。

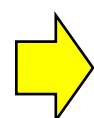
【相関】 **竜巻(主)** + **落雷(副)** = 高建築物倒壊→電流値 増加



設計基準の竜巻により遮蔽効果がある高建築物が倒壊した場合、防護対象設備への雷撃電流値が増加。増加した電流値に対する計器類の耐電圧値を調査し、健全性を確認。

Ⅲ-2. 他の自然現象の作用により影響が及ぶようになるケース

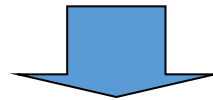
【独立】 **火山灰(主)** + **降水(副)** = 堆積した火山灰が降水で滑り、衝撃荷重発生



斜面に堆積した火山灰が押し流された場合、影響範囲が広がるものの、プラントと周辺の斜面までは一定の距離があり、影響が届かないと考えられる。また、プラント周辺およびアクセスルートは除灰の対象範囲であり、重畳事象が発生したとしても、影響は軽減されると考えられる。

5. 設計基準を超える外的事象の想定

- 福島事故の根本原因分析から得られた問題点
 - 巨大津波のように発生頻度の不確かさが大きく、クリフエッジ性が高い事象(重大影響となる外的事象)に備える考え方、仕組みが不足
- こうした認識の下に設計基準ハザードに対する取組み、設計基準を超えるハザードに対する取組みを区別して取り組んでいく
 - 設計基準ハザードに対する取組み
 - ✓ 設計基準をしっかりと設定して安全設備に影響を与えないようにする
 - 設計基準を超える外的ハザードに対する取組み (残余のリスクを低減させるための取組み)
 - ✓ 実質的に炉心損傷を防止、あるいは炉心損傷後の影響を緩和、放出を抑制できるようにする
 - ✓ 究極は設備的に最も直接的に機能を発揮させる手段を確保する取組み



ハザード分析を踏まえたリスク管理

- ✓ 規制要件を満足していれば良いということではなく、自ら原子力安全を向上させる(残余のリスクを低減させる)ための対策(改善)の検討に資する。

5. 設計基準を超える外的事象の想定（ハザードの同定）

- 自然現象に加え、意図的なものを含めた人為事象を追加
- 発生頻度の概念は無視（発生頻度を考えずにハザードを同定）
- 他のハザードに影響が包絡される事象は、他のハザードで代表

30事象を同定
（対象：柏崎刈羽）

自然現象	
地震及びその地震随件事象 1:地震 2:斜面崩壊(地滑り、山崩れ、崖崩れを含む) 3:地盤沈下(地盤沈降) 4:液状化現象 5:津波 6:火災 7:内部溢水 8:断層変位	風(台風)及びその随件事象 11:風(台風) 12:暴風による火災
	13:落雷
	14:積雪
	低温 15:低温 16:凍結
	17:森林火災
9:火山の影響	18:磁気嵐
10:竜巻	—
人為事象	
19:火災・爆発	25:軍事活動によるミサイルの飛来
20:有毒ガス	26:内部溢水
21:航空機衝突(意図的)	27:他号炉の内部溢水の伝播
22:妨害破壊行為	28:他号炉の内部火災の伝播
23:サイバーテロ	28:タービンミサイル
24:隕石／人工衛星の衝突	30:油流出

5. 設計基準を超える外的事象の想定（外的ハザードの特性調査①）

■ 一般的特性

➤ 隕石落下頻度

- ✓ 痕跡から大きさ・年代が推定される
- ✓ 空中爆発の場合痕跡が残りにくい
- ✓ 解析者により異なる条件設定
- ✓ 太陽系に存在する小天体の数は未知

(参考: 公開情報に基づく落下頻度)

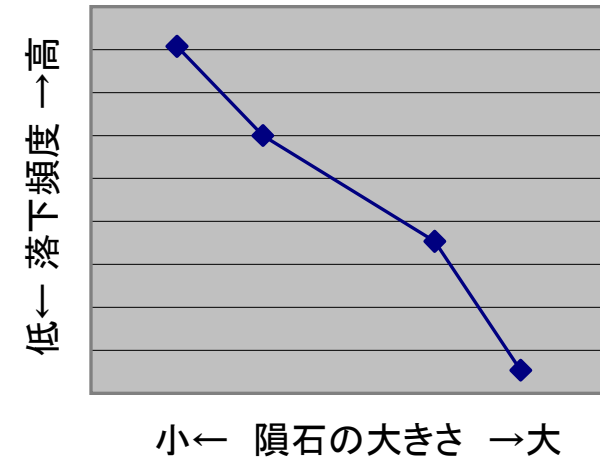
- ✓ 直径100mの隕石: 約 10^{-11} 回/y/発電所敷地

➤ 隕石落下予測など

- ✓ 世界十数箇所で監視(日本スペースガード協会など)
 - ✓ 小規模隕石(直径~数100m)は地球にかなり接近しないと発見できない
 - ✓ 迎撃は技術的に困難
- ⇒ **事前予測の所要時間に不確実さあり**

➤ 隕石の組成

- ✓ 金属、岩石質 など
- ⇒ **落下時の挙動予測(空中爆発、地面衝突等)に不確実さあり**



5. 設計基準を超える外的事象の想定（外的ハザードの特性調査②）

■ 一般的な発生事例

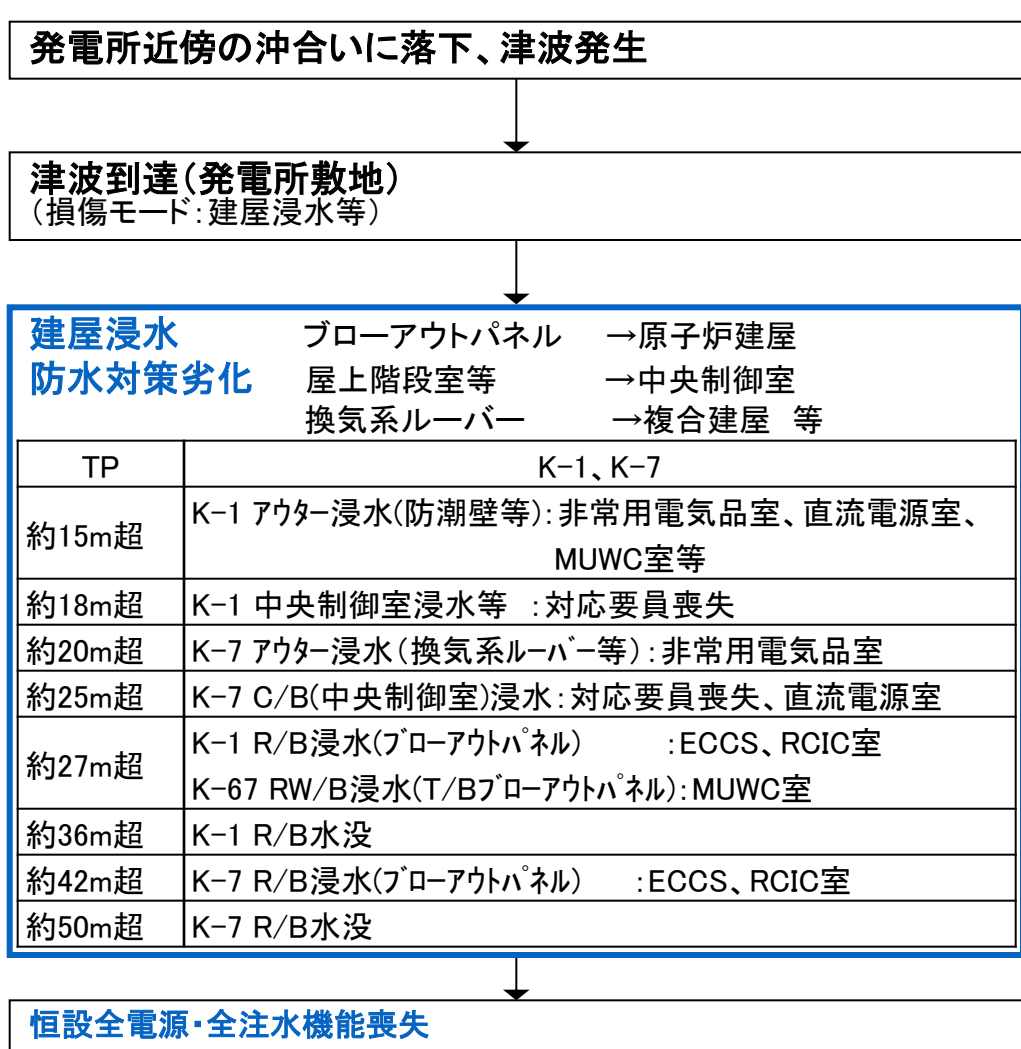
- ・ロシア・チェリビンスク(2013年)
 - －直径:約17m、重量約1万t
 - －衝撃波で人の負傷
 - －家屋損壊
 - －TNT換算0.5MTの衝撃力
- ・ユカタン半島(約6500万年前)
 - －直径:約10～15km
 - －巨大地震(M14)
 - －恐竜滅亡の原因との説あり
- ・ツングースカ(1908年)
 - －直径:約60～100m
 - －上空で爆発
 - －半径約30-50kmにわたって森林が炎上
 - －倒木の範囲は半径20～30km
 - －ビキニ水爆級
(ブラボー:TNT換算15MT)の衝撃力
(5～20MTと推定する説あり)
- ・スーダン上空(2008年)
 - －成層圏で爆発
 - －直径4.1m
 - －TNT換算1.1～2.1kTの衝撃力
 - －衝突前に落下予測された初の事例
(落下20時間前に発見)
- ・欧州人工衛星GOCE(2013)
 - －全長5m、重さ約900kg
 - －大気圏突入で炎上・分解、被害報告無し
(参考:国際宇宙ステーション完成時の重量:417t)

■ 一般的な脅威

- ・衝突荷重(直径～数10km)
- ・衝撃波
- ・輻射熱
- ・地震(～M10超)
- ・津波(津波高さ～数100m)

5. 設計基準を超える外的事象の想定（脅威の同定／影響モード抽出）

⇒海洋衝突はクリフエッジになり得る



隕石の規模

- ・ユカタン半島級は生態系に影響を及ぼす規模
- ⇒防護すべき人と環境も隕石で壊滅的な影響

津波高さ(ツングースカ級)

- ・以下の条件での津波高さは約48m(巨大津波)
- －衝突時の運動エネルギーの3%が海水の位置エネルギーに変換
- －中心から半径6kmの円心状に津波が発生(6km沖合いに落下を想定)
- －衝突地点の平均水深100m
- －運動エネルギー: 20MT
- －発生した津波高さが水深の4乗根に比例
- －港湾水深5m

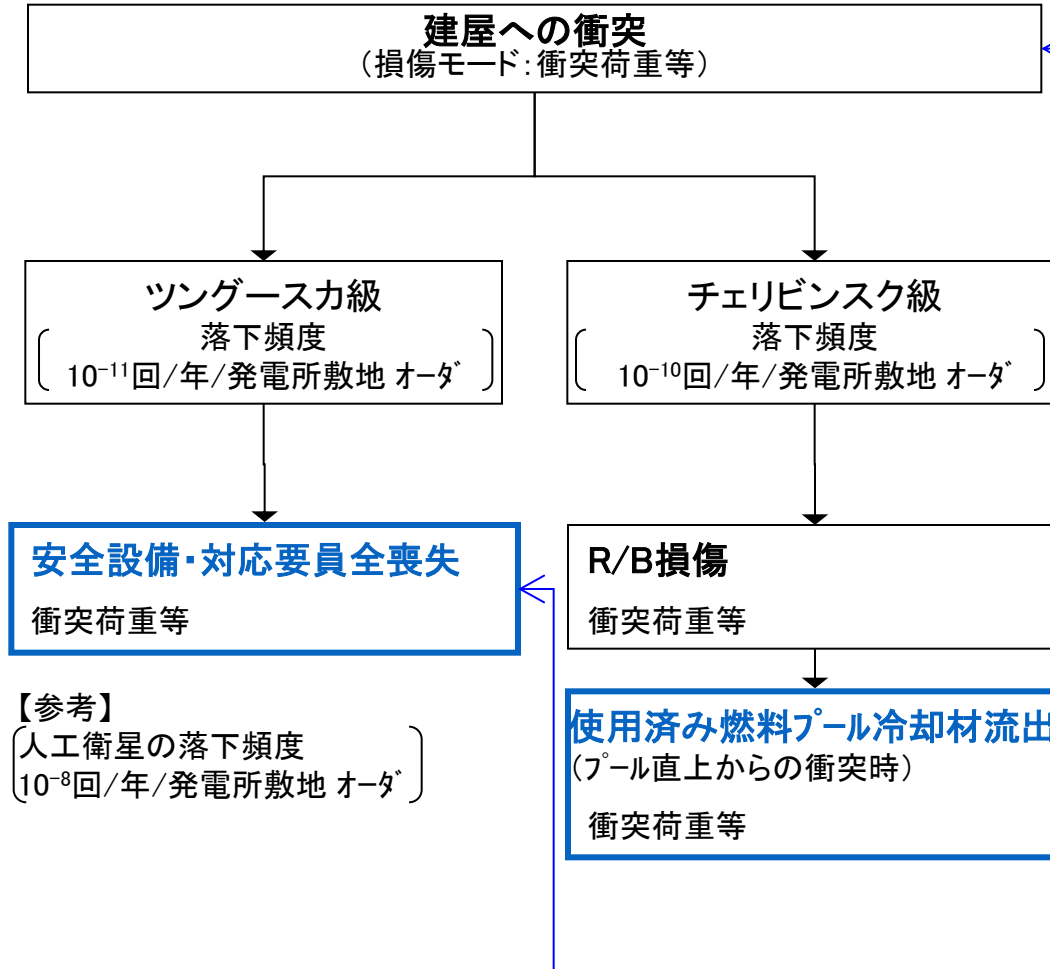
建屋高さ等(K-1/K-7の概算)

- ・原子炉建屋(R/B)屋上 : TP36 m/TP49.7m
- ・R/Bブローアウトパネル下端 : TP26.7m/TP41.1m
- ・コントロール建屋屋上 : TP18 m/TP24.1m
- ・換気系ルーバー等 : TP15 m^{※1}/TP19.8m^{※2}

※1: 防潮壁等、※2: DG非常用排気ルーバ下端

5. 設計基準を超える外的事象の想定（脅威の同定／影響モード抽出）

⇒ 建屋直撃はクリフエッジになり得る



【参考】
人工衛星の落下頻度
(10⁻⁸回/年/発電所敷地 オータ)

衝撃力(TNT換算)

- ・チェリビンスク級: 0.5MT
- ・ツングースカ級: 5~20MT
- (参考)大陸間弾道ミサイル(ICBM):
0.05MT(テポドン)、4MT(DF-5; 中国のICBM)

隕石の規模

- ・ユカタン半島級は生態系に影響を及ぼす規模
⇒ 防護すべき人と環境も隕石で壊滅的な影響

コンクリート厚

- ・R/B壁、燃料プール、PCVについて評価

コンクリート貫通距離

- ・建屋衝突により運動エネルギー減少
- ・隕石が衝突した場合のコンクリート貫通距離を評価

プール直上からの衝突

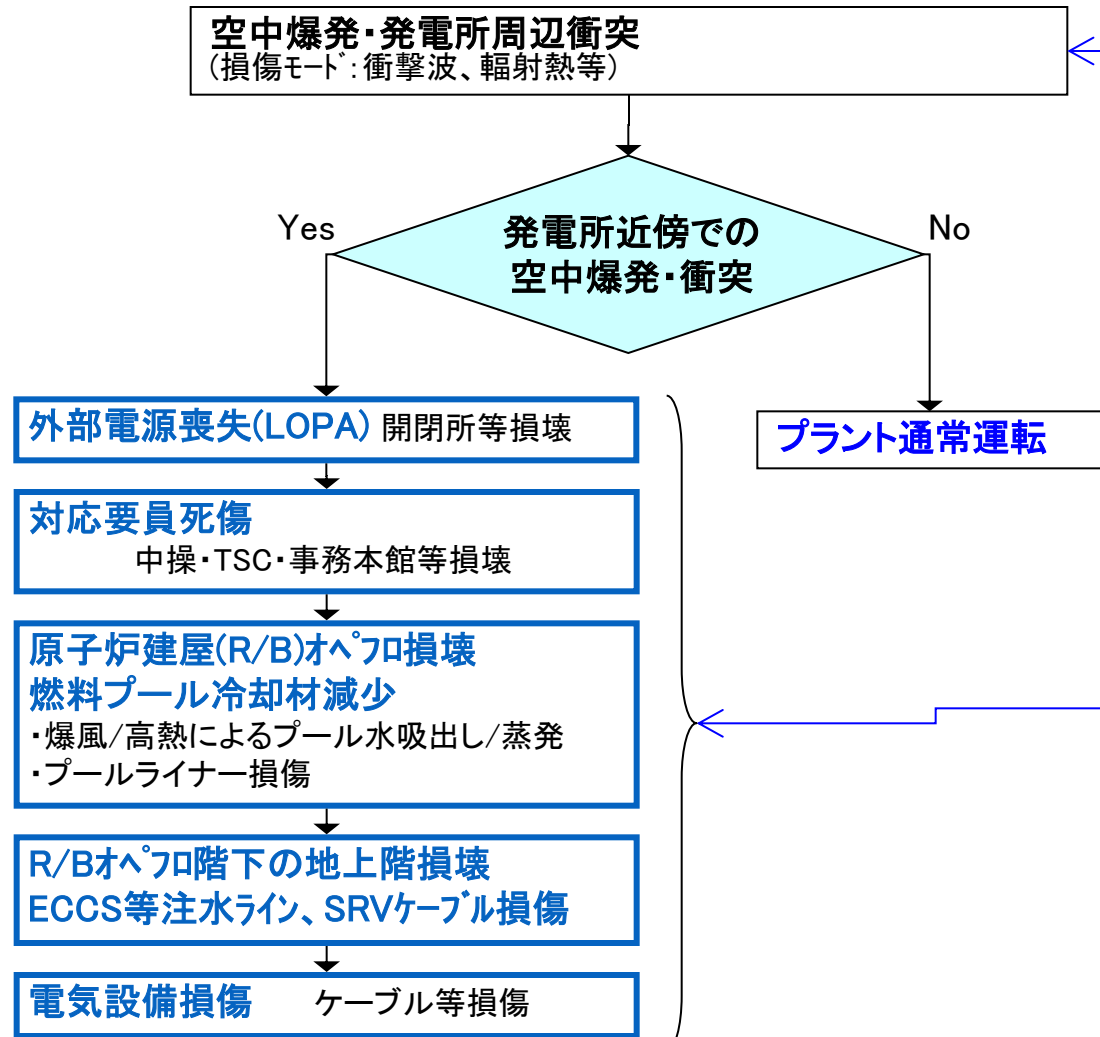
- ・建屋衝突、プール水抵抗で運動エネルギー減少もライナー損傷、コンクリート亀裂の可能性
- ・貫通亀裂の場合、亀裂の等価断面積約0.01m² (例えば5mm×2m)程度で補給水量を上回る流出の可能性

建屋直撃よりも発電所近傍への落下確率が高い

- ・R/B平面積: 約60m×60m、隕石落下はランダム

5. 設計基準を超える外的事象の想定（脅威の同定／影響モード抽出）

⇒空中爆発・周辺衝突はクシフェッジになり得る



衝撃力(TNT換算)

- ・チェリビンスク級: 0.5MT
- ・ツングースカ級: 5～20MT

(参考)大陸間弾道ミサイル(ICBM):
0.05MT(テポドン)、4MT(DF-5; 中国のICBM)

隕石の規模

- ・ユカタン半島級は生態系に影響を及ぼす規模
- ⇒防護すべき人と環境も隕石で壊滅的な影響

空中爆発

- ・チェリビンスク級
 - 一般建築物が損傷する程度
 - R/Bの頑健性は維持されると推定
- ・ツングースカ級
 - 倒木範囲: 半径20～30km
 - 爆発高度、方角によっては防護すべき人と環境も空中爆発で壊滅的な影響

発電所周辺衝突(ツングースカ級)

- ・周辺部丘陵地、建屋等が障壁となる可能性
 - 周辺部丘陵地(頂高60m前後)
 - R/B屋根(標高): 約36m(K-1)、約50m(K-6,7)
 - R/Bオペフロ(標高): 約18m(K-1)、約32m(K-6,7)
 - R/B、PCV壁

5. 設計基準を超える外的事象の想定（対応方針の決定①）

クリフエッジ性の推定

対応の方針(リソースの割当て)

クリフエッジに

なり得る

クリフエッジ になりにくくする（優先度高）

..... 具体策を検討

→設備面and/or運用面の対応

最悪の事態に直面した場合に
実施可能なことを整理

→評価精度向上の対応もあり得る

なりにくい

対応していく（優先度低）

..... 具体策を検討

→設備面and/or運用面の対応

- ・推定の精度向上が必要なら追加評価を実施
- ・判断不能ならハザードの検知・判断を中心に運用面の対応を検討

5. 設計基準を超える外的事象の想定（対応方針の決定②）

■対応方針

（津波誘発への対策）

- 建屋上部からの海水流入の影響を回避・緩和する対策

（建屋の直接衝突への対策）

- 燃料プールからの冷却材流出に備えた体制整備
- R/B直撃は最悪の事態に直面した場合に実施可能なことを整理

（空中爆発/周辺衝突への対策）

- 電気設備損傷で全電源喪失するも、その他の恒設安全設備の一部が使用可能であることを前提に、隕石落下を事前に把握し、極力対応要員を確保すると共に、生存者により地下階でプラント安全機能を回復するための体制整備

5. 設計基準を超える外的事象の想定（対策の検討・実施①）

（共通）

■ ハザード検知・判断

- 隕石落下情報（NASA、日本スペースガード協会等）入手体制整備
- 入手情報に基づく判断基準（プラント停止等）と実施内容の整備
- 災害時の初動対応（状況把握、通報、プラント対応等）の運用整備

（津波誘発への対策）

■ 停止・注水・除熱／電源

- 建屋内海水排水手段強化
- DC電源を計装に供給できる対策
- 原子炉減圧＋低圧注水強化
（減圧用可搬式蓄電池の防水＋現場接続先近傍への配置。消防車等高台配備）
- 原子炉建屋内に入域せずに安全機能を回復する方策

■ 要員確保

- MCRへの海水流入経路水密化又はTSC組織への当該プラント運転知識保有者配置、発電所外からの対応要員確保方法（発電所外での発電所の状態把握方法含む）整備 等

■ 教育・訓練

- 緊急時プラント対応要員以外の所員への、隕石落下時のプラント制御に関する教育・訓練 等

5. 設計基準を超える外的事象の想定（対策の検討・実施②）

（建屋の直接衝突への対策）

■ 停止・注水・除熱／資機材／教育・訓練

- 燃料プール冷却材流出時の燃料冷却の方策（SFPスプレイ、流出停止等）
- 資機材整備、訓練実施

（空中爆発/周辺衝突への対策）

■ 停止・注水・除熱／電源／パラメータ監視／資機材

- 注水・除熱・電源確保、パラメータ監視のための資機材事前確保
- 事前移動(地下階等)、対応方法の整備

■ 要員確保

- 様々な方法による要員確保
 - ✓ 地下等の避難場所確保、地下等への避難場所指定・避難方法の整備、
 - ✓ 発電所外からの対応要員確保方法の整備 等

■ 教育・訓練

- 緊急時プラント対応要員以外の所員への、隕石落下時のプラント制御に関する教育・訓練 等

5. 設計基準を超える外的事象の想定（対策の検討・実施③）

- 隕石の衝突等による使用済燃料プール水の漏えいや原子炉建屋の損壊等は、新規制基準における大規模損壊への備えとして準備したことで対応できる
 - 使用済燃料プール水の漏えいについては、プール壁の損傷箇所を鉄板で塞ぎ、漏えいを緩和する手順を整備
また、プール水位が保持できなくとも、常設又は可搬のスプレイノズルによる注水冷却手順を整備
 - 中央制御室が使用不能となっても、可搬計器を用いて、現場でプラントパラメータを確認する手段を整備
 - 建屋損壊等により建屋内にアクセス不能かつ建屋内の配管が使用不能となっても、大容量送水車及び放水砲による散水により冷却及び放射性物質の拡散抑制の手段を整備

- 一方、隕石津波の対策については、35mの高台に消防車等の可搬設備を分散配置しているものの、建屋内が大量浸水することを想定した場合に、常設の蒸気駆動高圧ポンプの蒸気配管を断熱材で覆う等による信頼性向上策を検討しているが、現時点で実現に至っていない

5. 設計基準を超える外的事象の想定（各事象のクリフエッジ性）

■クリフエッジ性の推定

【凡例】 ○:クリフエッジになり得る， △:クリフエッジになりにくい

ハザード	クリフエッジ性	ハザード	クリフエッジ性	ハザード	クリフエッジ性
隕石/人工衛星の衝突	○	積雪	△	火災(地震随伴)	○
軍事活動による ミサイルの飛来	○	低温	△	森林火災	△
妨害破壊行為	○	凍結	△	暴風による火災	△
サイバーテロ	○	地震	○	航空機衝突	○
火山の影響	○	断層変位	○	内部溢水	△
有毒ガス	△	斜面の崩壊	△	他号炉の内部溢水の伝播	△
タービンミサイル	○	地盤沈下(沈降)	△	内部溢水(地震随伴)	○
竜巻	△	液状化現象	△	津波	○
磁気嵐	△	火災・爆発	○	風(台風)	△
落雷	△	他号炉の内部火災の伝播	△	油流出	△

5. 設計基準を超える外的事象の想定 (ハザードのレベルと対策)

ハザード (類似ハザード) ハザードのレベル (黄色の吹き出しは、具体化の検討に取り組む対策の例
青の吹き出しは、壊滅的影響への対処案 (継続検討含む)) 弱 ← → 強

水影響		~8m	8~12m	12~15m	15m超 (短期間)	15m超 (長期間)	対策
津波 (地震随伴、山体崩壊 隕石 (海洋衝突) 海底火山)	安全設備健全		ドライサイト対応分、 可搬設備のみ健全	DEC1のみ健全	水没しても動くもの(HPAC) • DEC2のみ健全 • 可搬設備は排水後、 排水 (敷地内・建屋内)	• 恒設安全設備喪失 • 対応要員不能	サイト要員によるFP放出抑制 (PCVフタアップ)
	安全設備健全	Ss未済	建屋損壊 (屋内アクセス可)	建屋損壊 (屋内アクセス不可)	Ss超※4 • 一時退避 • 応援要員を受入れる策	建屋損壊 (壊滅的)	サイト外要員によるFP放出抑制 (建屋積極破壊、石棺)
地震 (断層変位)	安全設備健全		• 内部漏水発生 → [津波] • R/B内設備健全の可能性	R/B内状況把握不能 FP放出抑制、建屋入口近傍からの冷却	• 安全設備無 • 対応要員有	• 安全設備無 • 対応要員無	[津波]と同様
	安全設備健全	敷地周辺	RSS/現場での監視と現場での機能回復	建屋損壊 (部分的)	建屋損壊 (壊滅的)	建屋直撃	サイト要員によるFP放出抑制 (R/B外部スプレー等)
物理的荷重 (隕石/人工衛星 軍事ミサイル 航空機衝突 妨害破壊行為 (火炮攻撃) タービンミサイル)	安全設備健全	地上ラインと地下ラインを分離する対策	• 地下階安全設備のみ健全 • 要員の一部対応不能 • 流出抑制 • 流出後に冷却する手段	• SFP冷却材流出 (遮へい低下による接近不能) • MCR要員対応不能	• 安全設備無 • 対応要員有	• 安全設備無 • 対応要員無	[地震]と同様
	安全設備健全	火砕流・火山灰到達せず	陸路寸断 海路からの人員・物資補給手段	• 屋外設備、建屋損傷 • 対応要員不能	火砕流・火山灰到達 建屋損傷を遅らせる策 (火山灰)	• 安全設備無 • 対応要員有	[地震]と同様
火熱影響 火山	安全設備健全	単一火災	防火・消火設備健全	防火・消火設備使用不能	• 火災の検知不能 • 複数区分の誤動作・誤表示の可能性	• 安全設備無 • 対応要員有	サイト要員によるFP放出抑制 (PCVフタアップ、 PCV、R/B外部スプレー)
	安全設備健全	複数同時火災	• 火災の検知可能 • 複数区分の誤動作・誤表示の可能性	• 火災の機能喪失を想定した火災の検知手段 • 既設消火設備の使用不能を想定した消火戦術の検討	• 火災の検知不能 • 複数区分の誤動作・誤表示の可能性	• 安全設備無 • 対応要員有	
電気・磁気影響 サイバーテロ	安全設備健全	情報系侵入	• 火災区分毎のプラント対応	制御系侵入	異常認知可能	異常認知不能	• 厳しいプラント状態に陥ったことの検知 (可搬型線量計による常時線量計測等) • サイト要員によるFP放出抑制 (PCV、R/B外部スプレー)
	安全設備健全	単独行動	• 監視、プラント状態把握不能 • 遠隔制御不能	異常認知不能	• 監視、プラント状態把握不能 又は • 遠隔制御不能	対応困難 (炉心損傷)	
その他 妨害破壊行為 (サボタージュ)	安全設備健全	単独行動	他者 (当直員等) により回復	集団行動	• モニタリング維持 • 核セキュリティ意識向上	過渡変化誘発、安全機能不能、炉心損傷	[サイバーテロ]と同様



6. 重大事故等対処設備に対する設計上の考慮

- DB設備と同じ機能をもつSA設備が共通要因で同時に機能を喪失させない
 - DB設備等と位置的分散
 - 外部衝撃による損傷防止が図られた建屋内に設置・保管
 - サポート系の故障に対して、異なる駆動源、冷却源の採用
 - 異なる水源
- 可搬型SA設備
 - 防火帯内側の複数箇所に分散保管
 - 主要建屋から100m以上の離隔距離
 - 異なる壁の複数の箇所に接続口
- 復旧作業(リアリティ)
 - 複数のアクセスルート
 - 復旧作業に伴う被ばく評価



6. 重大事故等対処設備に対する設計上の考慮(可搬設備)

用途	可搬設備
注 水	消防車 × 42台
電 源	ガスタービン発電機車(4500kVA・6.9kV) × 4台 電源車 24台 500kVA・6.6kV × 24台
除 熱	代替海水熱交換器車 × 8台
放出抑制 消 火	大容量放水設備 × 5セット 高所放水車 22m級 × 1台、27m級 × 1台
がれき撤去	ホイールローダー × 4台 ショベルカー(バックホウ) × 2台 ブルドーザー(キャタピラ式) × 1台
燃料補給	燃料給油車4kリットル × 4台 16kリットル × 1台

個別訓練

社員自ら訓練を積み重ねている

がれき撤去や
道路の段差を埋める訓練



ガスタービン
発電機車の
操作訓練



消防車の
操作訓練



大容量放水設備
の操作訓練

7. 大規模損壊対応の評価

- 設計基準超では、大規模損壊の可能性（被害の態様は様々）
 - 残存するDB設備、SA設備の活用
 - 炉心損傷・格納容器破損の緩和、放射性物質の放出低減等
 - 体制・手順等の確認

- 考慮すべき外的事象を選定し、誘引される起因事象の特定、影響を踏まえ、有効性評価に包絡されない事象に対し対応が取れることをケーススタディにより確認（地震、津波、風（台風）、竜巻、低温（凍結）、降水、積雪、落雷、火山、隕石）
 - 代表性を考慮して、地震、津波、地震と津波の重畳、大型航空機の衝突

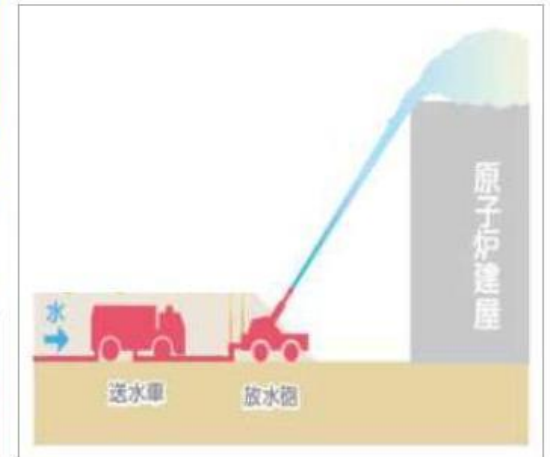
大容量放水設備

- ・原子炉建屋上部への大量の放水が可能（1時間あたり900m³以上）
- ・放射性物質の大気への拡散を抑制（大量の水滴で叩き落とす）

送水車



放水イメージ



放水砲



貯水池での放水訓練

8. 柏崎刈羽原子力発電所で実施している訓練（1）

■ 個々の要員の教育・訓練（要求時間の設定）

アクセスルート確保（瓦礫撤去）



設備	訓練回数
ホイールローダ等	5078回

（訓練回数の数値はH29.11.20現在）

設備	訓練回数
電源車	635回
消防車	1173回
代替熱交換器車	618回

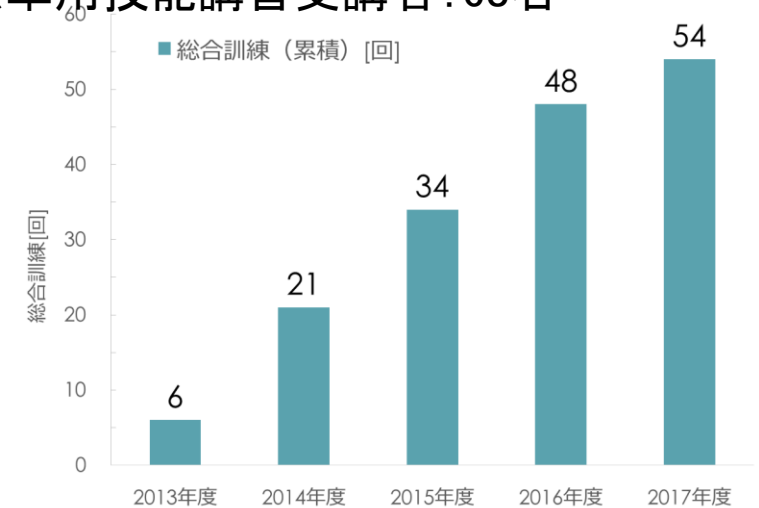


大型運転免許：156名、大型特殊免許：91名、牽引免許：87名、がれき撤去車用技能講習受講者：68名

■ 福島第一事故で本部長に情報が集中しすぎた反省を踏まえ、個々の機能班が自律的に活動していく体制

■ 総合訓練として、厳しい自然現象や航空機衝突等を想定した訓練（ブラインド）を月に一回以上実施

⇒柔軟な対応力の育成



8. 柏崎刈羽原子力発電所で実施している訓練 (2)

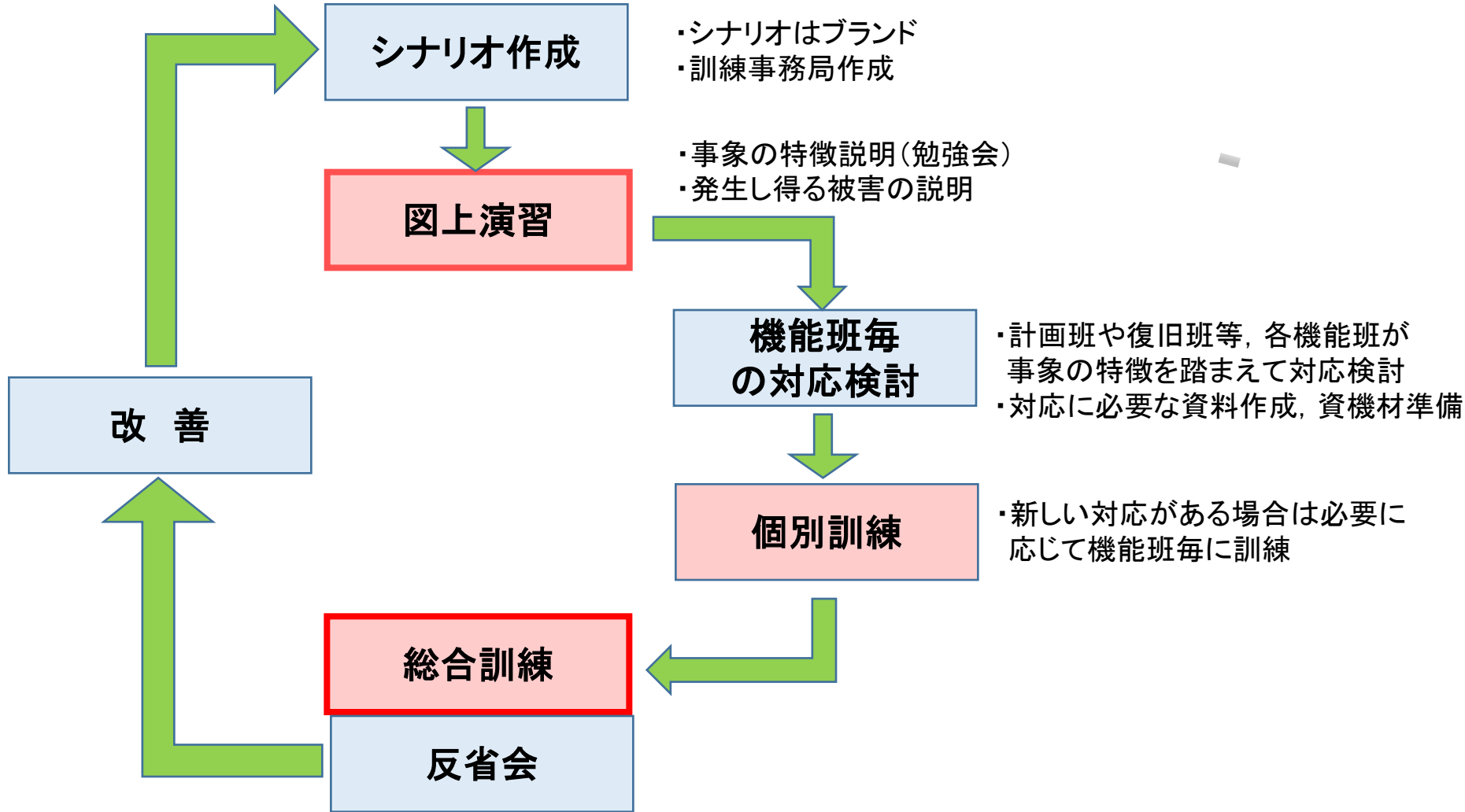
■ 総合訓練の多様なシナリオの例

- 地震による全交流電源喪失＋複数プラント同時被災
- 航空機衝突による放射性物質系外放出
- 竜巻による全交流電源喪失＋通信障害＋負傷者発生
- 落雷による全電源喪失（中操現場暗闇）
- 隕石＋随伴巨大津波
- ATWS＋LOCA
- 高高度電磁パルス(HEMP)に対する運転員訓練

(マルファンクションとして、多数の負傷者、火災、通信途絶など)



8. 柏崎刈羽原子力発電所で実施している訓練 (3)



9. 継続的な安全性向上の取り組み (1)

- RIDMの導入に向けた取り組み
 - PRAモデル高度化
 - 外的事象のスコープ拡大
 - 日常リスク管理ツールとしての活用拡大
- 取組内容は安全性向上評価において取り纏め

PRAの評価スコープ拡大の取り組み (例)

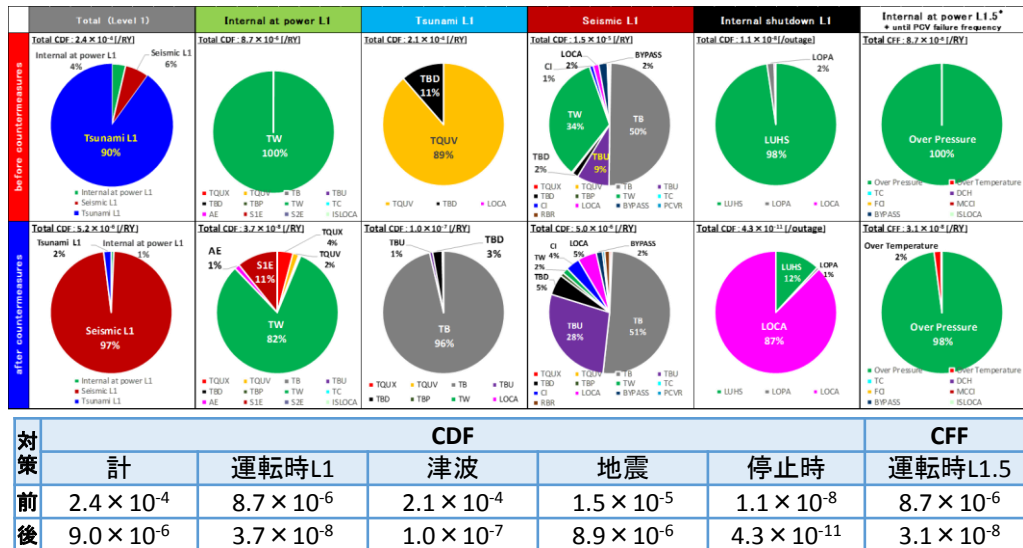
- 溢水PRAで止水対策を試評価し、弱点を抽出
 - コントロール建屋における消火系からの溢水
 - タービン建屋における循環水系からの溢水

溢水PRAの今後の課題

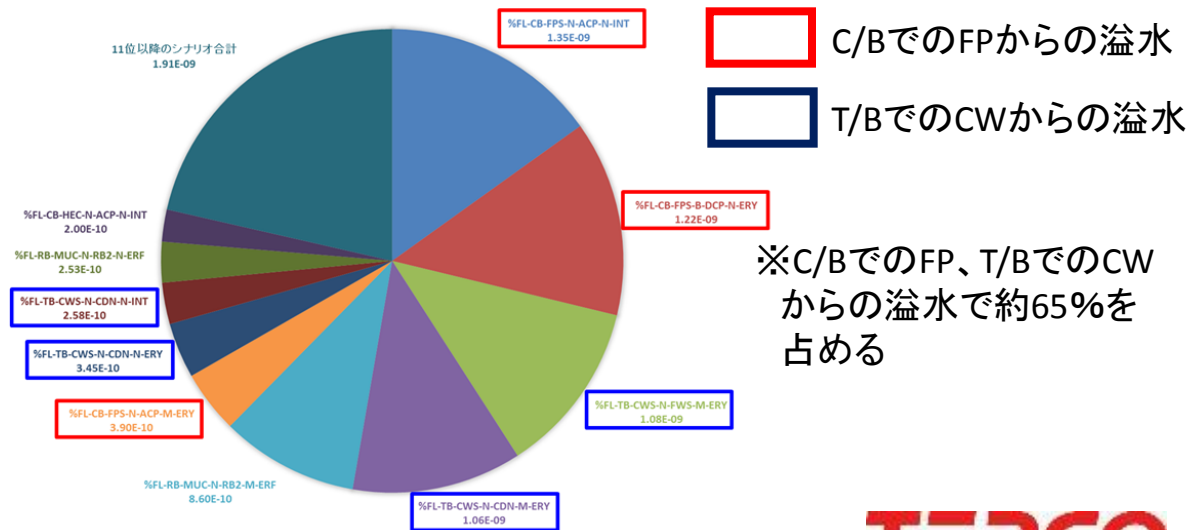
- プラント状態の更新 (as-is状態へ)
- 内的事象高度化を反映したPRAモデルへの更新

PRAによって安全対策の効果を評価 (例)

- 運転時L-1、津波、地震、停止時PRA
- 運転時L-1.5PRA



各溢水シナリオの寄与割合



9. 継続的な安全性向上の取り組み (2)

■ 外的事象における課題

① 現実的な評価の追及

⇒ ハザード・損傷モード等評価における保守性の排除

保守性を排除した評価 地震PRA (例)

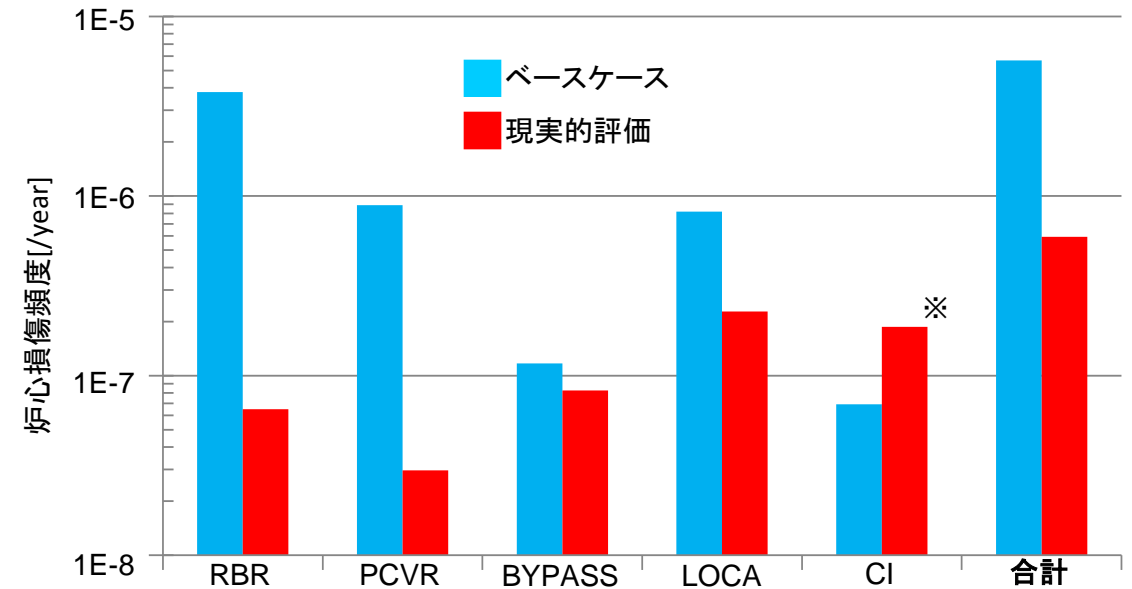
- 支配的なシナリオが炉心損傷直結シナリオ
 - 保守性を排除した現実的な事故シナリオを考慮
 - 現実的な脆弱性を把握することができる

地震PRAの今後の課題

- 建屋フラジリティ
建屋の一部損傷と機器損傷の関連性、隣接建屋への波及影響 等
- 地盤フラジリティ
斜面・地盤フラジリティ評価手法の精緻化
- 機器フラジリティ
設備の損傷モードによる影響の精緻化、車両設備等のフラジリティの確立 等
- FT
冗長設備の部分相関にかかわる知見の収集 等

...

評価結果(評価手法変更前後の比較)



※ イベントツリー前段のヘディング(RBR等)の詳細評価を実施した結果、イベントツリー後段のヘディングの炉心損傷頻度が相対的に高くなる

RBR: 原子炉建屋損傷、 PCVR: 格納容器・圧力容器損傷、
BYPASS: 格納容器バイパス、 LOCA: Excessive-LOCA、
CI: 計測・制御系喪失

9. 継続的な安全性向上の取り組み (3)

■ 外的事象における課題

- ②発生頻度を定量的に評価できない事象への備え
⇒ハザードの定性的分析による緩和策の多様性検討

定性的分析による緩和策 HEMP (例)

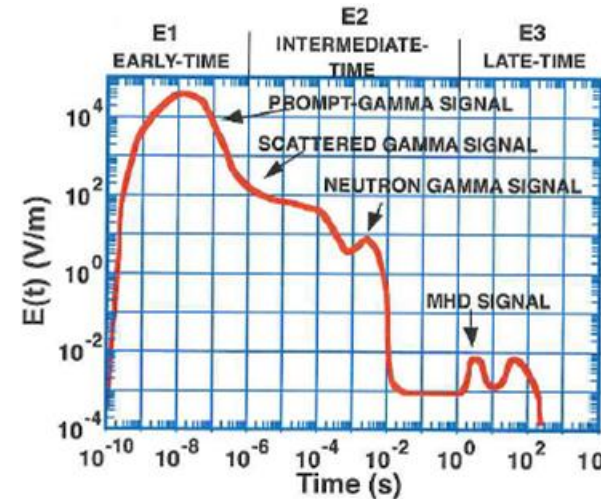
- 影響範囲の特定が困難
 - 電子機器を内包する設備が全て機能喪失すると保守的に仮定
 - 静的機械設備のみによる注水手段の検討
- 影響軽減効果を考慮した対策による多様性の確保
 - 遮蔽効果がある設備へ資機材を収納
 - 動的機械設備も利用した注水手段の検討

HEMPに関する今後の課題

- 注水手段の成立性の確認
 - 実設備を用いた成立性確認試験方法の検討
- 遮蔽効果の知見収集
 - 定量的な遮蔽性能を把握するための知見収集



1958年に米国ジョンストン島上空で行われた核実験



HEMPの電界影響 (引用: IEC SC77C)

高度40km以上での核爆発で、発生した電磁パルス (HEMP: high-altitude electromagnetic pulse) は人体へ影響を与えないが、電子機器等に障害を与える性質を持つ。その影響は広範囲に及ぶ。

1962年の米国ジョンストン島での核実験 (TNT換算:1.4MT) では、高度400kmの外気圏で実施され、爆発は人工のオーロラを発生させると共に、HEMPによる影響で約1500km離れたハワイ諸島に停電を引き起こした。

E1: 制御等の電子機器を破壊
電界強度が大きい極めて短時間のため大容量の誘起電流は流れない。しかし構造物の深くまで浸透し、電子機器の動作性に影響を与える。

E2: 制御等の電子機器を破壊
振幅は弱く、一般的な落雷防止のシステムでその影響を阻止可能。ただし、E1で破壊された箇所から入り込み、ダメージを拡大させる可能性有り。

E3: 送電用変圧器を破壊
数百秒オーダーで継続し、送電系統等に誘起する電流による発熱が問題。

10. まとめ

- 福島第一事故の教訓のひとつである外的事象による共通要因対策を整備
- 従来に増して設計基準を厳しく設定
- 設計基準を超える事象への対応が可能であることを確認
- 位置的分散等の多様性を考慮した可搬設備等を配備し、具体的な手順や体制として作り込み
- 特に設計基準を超える対応には柔軟性が必要であり、様々な状況に対応できるよう、個別要員の訓練や総合訓練を繰り返し(訓練は日常業務)
- さらなる信頼性向上のため、離隔距離をとった固定式の特定重大事故等対処施設を計画
- 継続的な安全性向上の取り組み
- これらの取り組みを通じて、発電所員の安全意識が高まり、安全性向上のインセンティブにもつながってきていると認識