

原子力安全部会フォローアップセミナー

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)

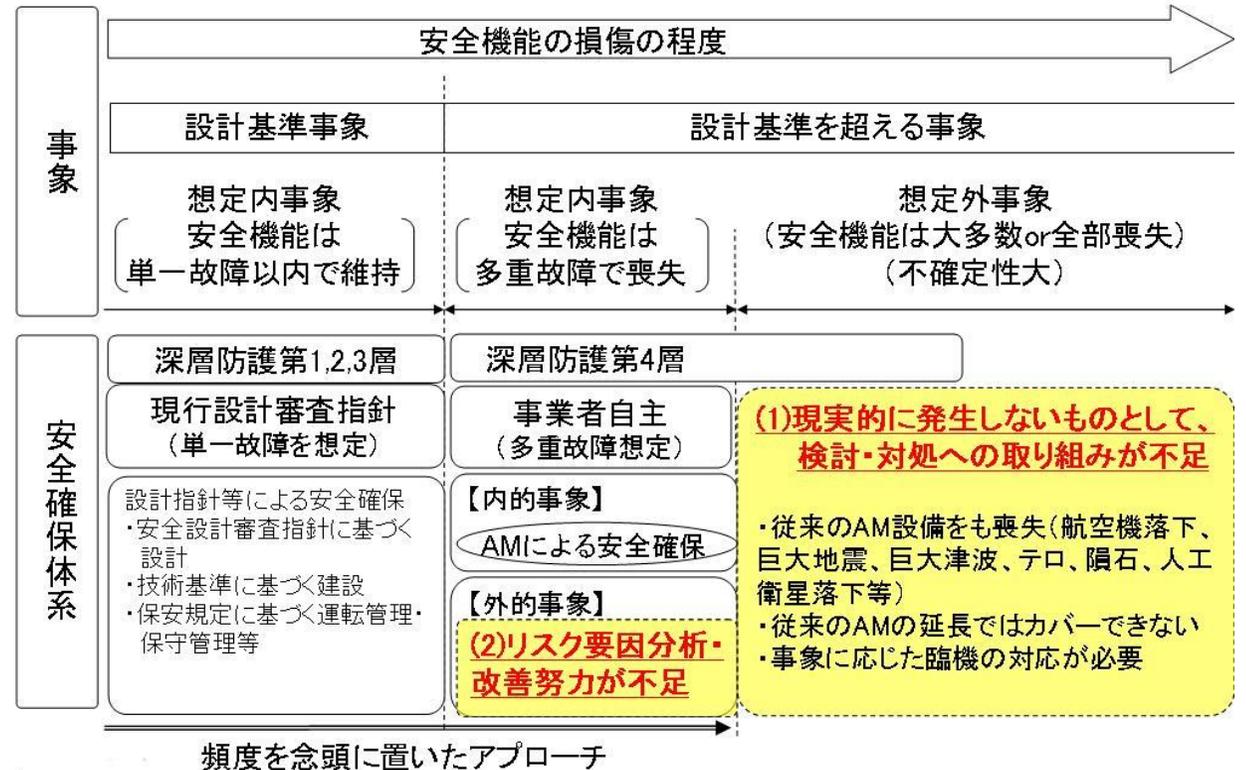
● 設計基準事象を超える領域は、事業者自主の
アクシデントマネジメント(AM)
(PRA活用も、内の事象が対象)

【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

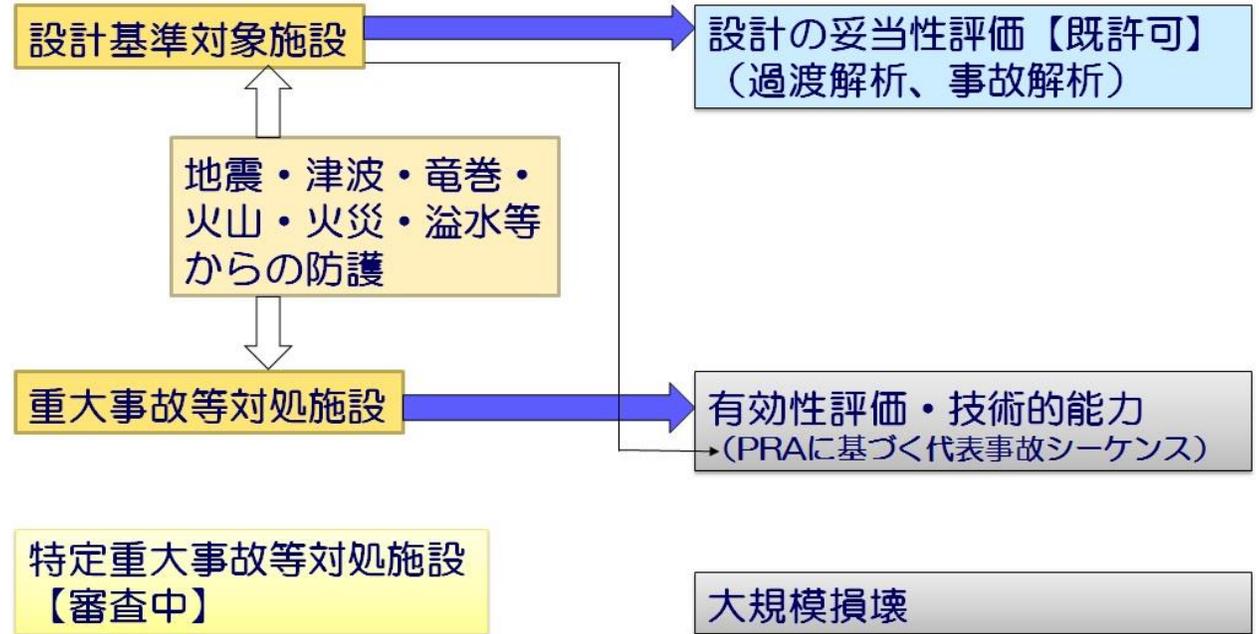
従来の安全確保体系からみた福島事故の原因分析



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(その1)

●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、42の自然現象と19の人為事象を抽出

●一次スクリーニングをし、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)と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)を詳細評価対象

●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(その2)

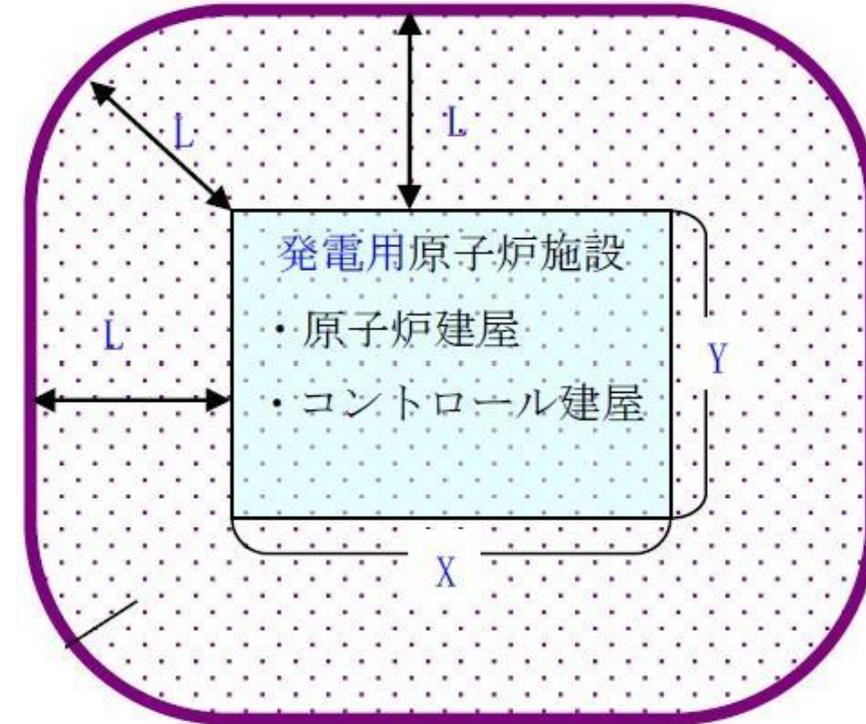
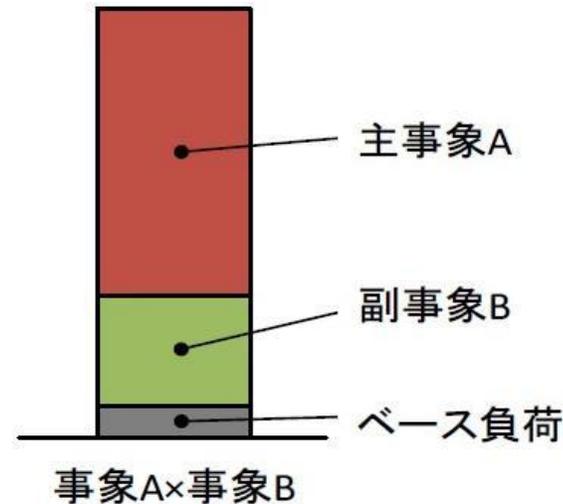
●人為事象の規模:敷地内外に存在し得る最大のハザード
(航空機落下は年超過確率 10^{-7} を踏まえた評価)

●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



10^{-7} [回/炉・年]となる標的面積=S



←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

5. 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



5. 重大事故等対処設備に対する設計上の考慮(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
- 海水熱交換: 代替海水熱交換器車 × 8台
- 大容量放水設備: 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

6. 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

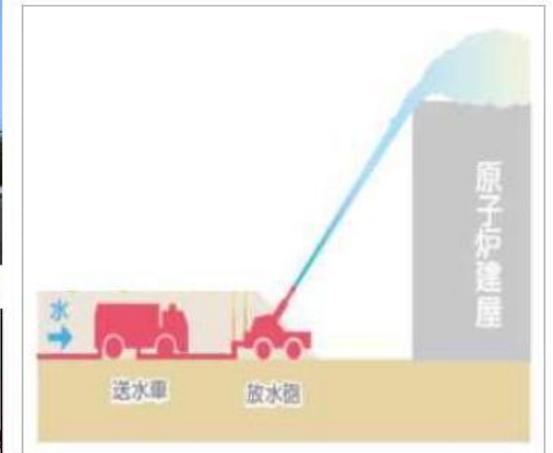
大容量放水設備

- ・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



7. 柏崎刈羽原子力発電所で実施している訓練(その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



7. 柏崎刈羽原子力発電所で実施している訓練(その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. 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
 - ーPRAモデル高度化
 - ー外的事象のスコープ拡大
 - ー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)

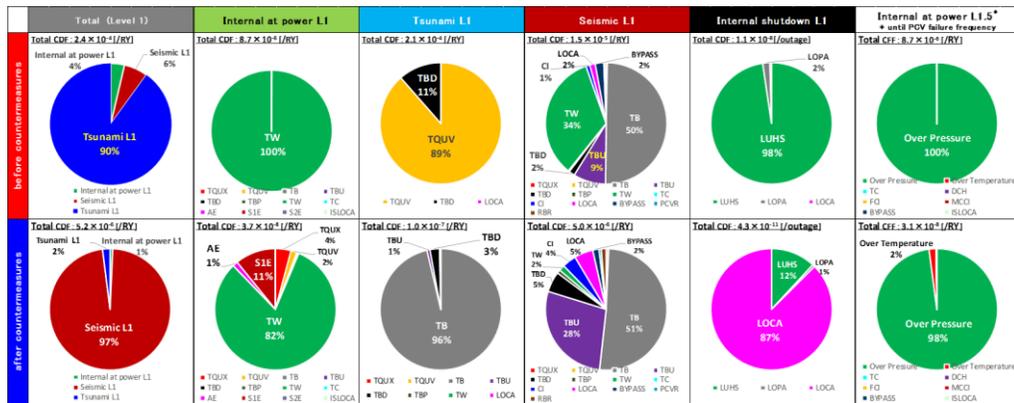
- 溢水PRAで止水対策を試評価し、弱点を抽出
 - コントロール建屋における消火系からの溢水
 - タービン建屋における循環水系からの溢水

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

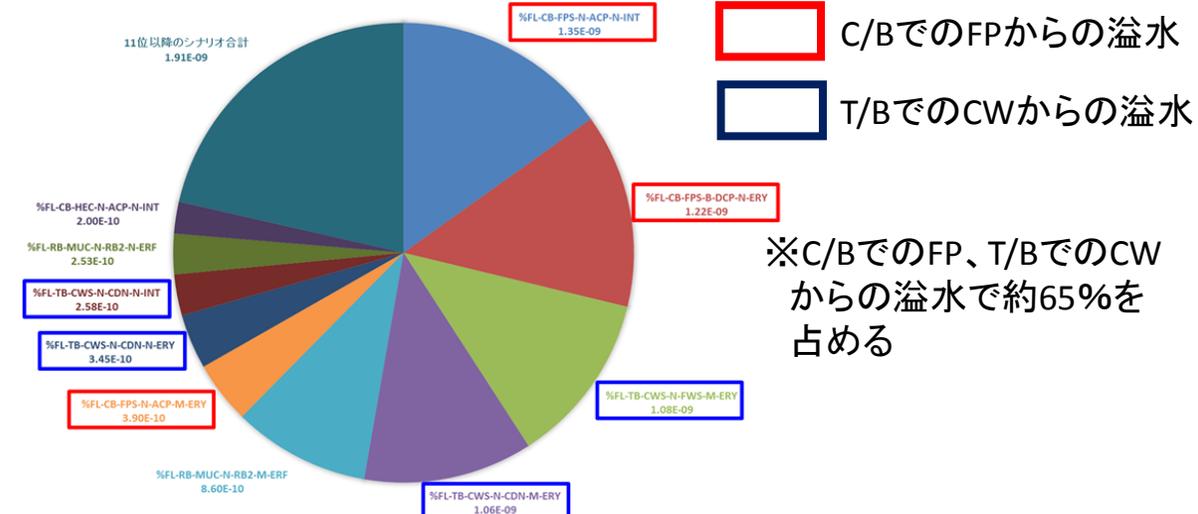
PRAによって安全対策の効果を評価 (例)

- 運転時L-1、津波、地震、停止時PRA
- 運転時L-1.5PRA



対策	CDF					CFF
	計	運転時L1	津波	地震	停止時	運転時L1.5
前	2.4×10^{-4}	8.7×10^{-6}	2.1×10^{-4}	1.5×10^{-5}	1.1×10^{-8}	8.7×10^{-6}
後	9.0×10^{-6}	3.7×10^{-8}	1.0×10^{-7}	8.9×10^{-6}	4.3×10^{-11}	3.1×10^{-8}

各溢水シナリオの寄与割合



※C/BでのFP、T/BでのCWからの溢水で約65%を占める

8. 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)

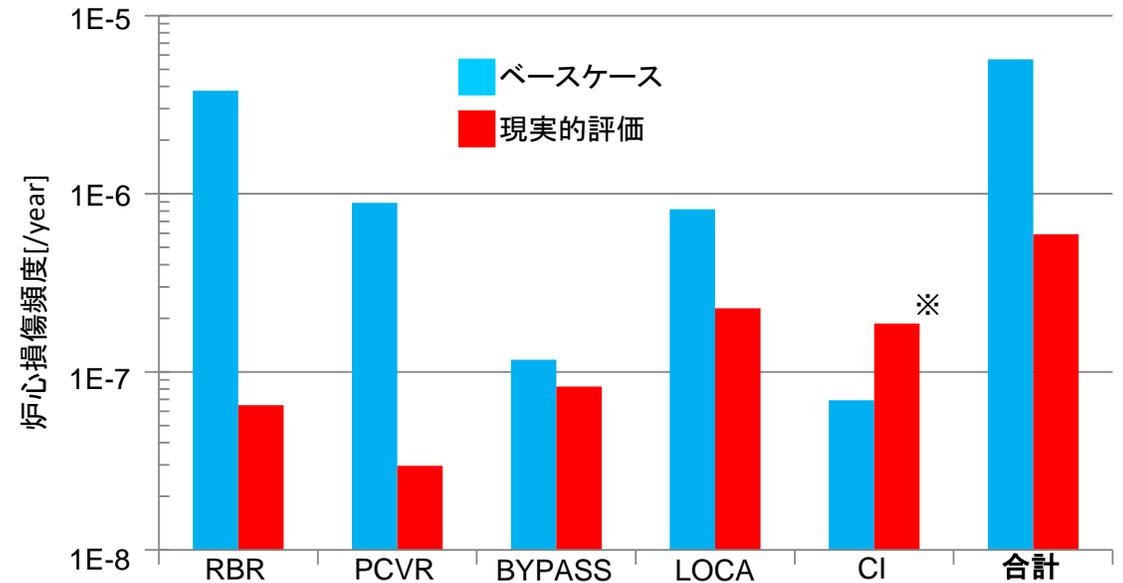
- 支配的なシナリオが炉心損傷直結シナリオ
 - 保守性を排除した現実的な事故シナリオを考慮
 - 現実的な脆弱性を把握することができる

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

8. 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)

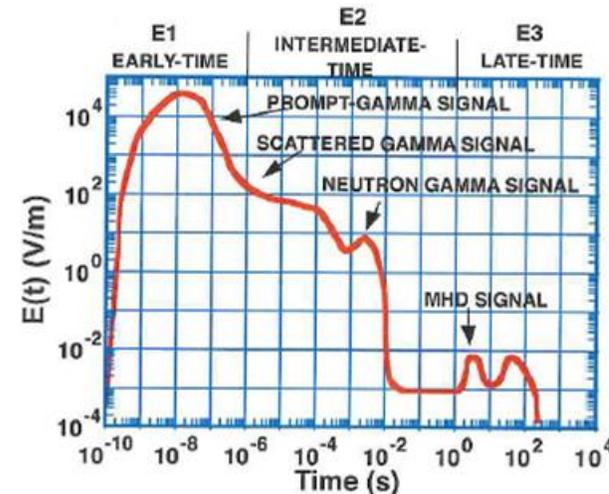
- 影響範囲の特定が困難
 - 電子機器を内包する設備が全て機能喪失すると保守的に仮定
 - 静的機械設備のみによる注水手段の検討
- 影響軽減効果を考慮した対策による多様性の確保
 - 遮蔽効果がある設備へ資機材を収納
 - 動的機械設備も利用した注水手段の検討

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。

9. 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