

日本地震工学会  
原子力安全のための耐津波工学の体系化に関する調査委員会  
(耐津波工学委員会)

3章 原子力発電所の地震・津波事故シナリオ  
(Accident scenarios at NPPs under earthquake-tsunami actions)

平成25年5月16日  
日本建築学会 3階会議室

蛸沢 勝三/中村 隆夫  
原子力安全基盤機構/大阪大学

2011地震・津波における福島第1NPP事故からの教訓(1/5)

マルチユニット

マルチハザード

共通原因損傷

FP放出

複合災害

住民避難

|                            |               |
|----------------------------|---------------|
| ■ 残余のリスクの顕在化+情報伝達脆弱性の顕在化   | ⇒ 周辺住民の広域避難   |
| ■ マルチユニット/マルチハザード/共通原因損傷   | ⇒ 外的事象の恐さ     |
| ■ 巨大本震/余震、誘発地震、地殻変動        | ⇒ 科学的想像力の欠如   |
| ■ 多重防護/冗長性は有効か             | ⇒ 内的事象との決定的相違 |
| ■ レベル1, 2, 3PRAの重要性の再認識    | ⇒ 一般防災との連携    |
| ■ 原子力リスクのコミュニケーションの重要性の再認識 | ⇒ 市民と専門家、専門家間 |
| ■ 人材育成及び国際連携の強化            |               |

「技術ガバナンス」の重要性の認識 2

3. 原子力発電所の地震・津波事故シナリオの目次

- 3.1 はじめに (蛸沢/中村)
- 3.2 東日本大震災における原子力発電所の挙動 (中村)
  - 3.2.1 各原子力施設の挙動(福島第一、第二、女川、東海、東通NPP等)
  - 3.2.2 既往報告書での事故シナリオの特徴(違い)
- 3.3 津波を起因として想定される事故シナリオ (中村)
  - 3.3.1 全体シナリオ
  - 3.3.2 原子炉停止(臨界防止)
  - 3.3.3 電源の喪失
  - 3.3.4 冷却機能喪失
  - 3.3.5 閉じ込め機能喪失
  - 3.3.6 設備の修復作業やアクシデントマネジメントによる機能回復
- 3.4 津波に起因して事故の発生・進展に大きな影響を与える事項 (蛸沢)
  - 3.4.1 ハザード関連
  - 3.4.2 多数基におけるプラント内の構造物・システム・機器の脆弱性関連
  - 3.4.3 ヒューマン関連
  - 3.4.4 情報通信手段の喪失
- 3.5 プラント生涯(立地/設計/評価/建設/運転/廃炉)各段階毎の3.4事項 (蛸沢)
- 3.6 他章との関連等( 9章 一般防災、コミュニケーション、付録 人材育成) (蛸沢)
- 3.7 事故シナリオに係る課題とロードマップ (蛸沢/中村)
- 3.8 まとめ (蛸沢/中村)

「残余のリスク」の定義と判断指標(2/5)

(1) 基準地震動を上回る地震動の影響が施設に及ぼすことにより施設の重大損傷事象が発生すること

(2) 大量の放射性物質が放散する事象が発生すること

(3) 結果として周辺公衆に対して放射線被ばくによる災害を及ぼすこと

重大事象(炉心損傷)発生

放射性物質の放散

周辺公衆の被ばく

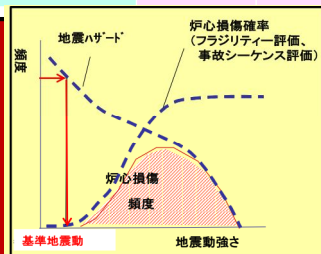
レベル1PRA

レベル2PRA

レベル3PRA

|                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------|
| ■ 安全目標(案): 敷地境界付近の公衆の個人平均急性死亡リスク敷地周辺の公衆の個人平均がん死亡リスクが $10^{-6}$ /年・サイト程度以下 |
| ■ 性能目標: 炉心損傷頻度( $10^{-4}$ /炉・年)、<br>且つ格納容器機能損傷頻度( $10^{-5}$ /炉・年)以下       |

|                                                                                                                    |           |          | レベル1                             | レベル2                | レベル3                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| <b>外的事象</b><br>・多数基<br>・自然ハザード(不確実さ大)<br>・複数機器の同時損傷<br>⇒多重性、冗長性は効果小<br>⇒多様性が重要<br>⇒スクリーンアウト=10 <sup>-7</sup> (1/回) | 地震        | ヒューマンエラー | ・地震PRA<br>実施基準<br>・津波PRA<br>実施基準 | レベル2<br>PRA実施<br>基準 | レベル3<br>PRA実施<br>基準 |
|                                                                                                                    | 津波        |          |                                  |                     |                     |
|                                                                                                                    | 地震起因火災    |          |                                  |                     |                     |
|                                                                                                                    | 地震起因斜面崩壊  |          |                                  |                     |                     |
|                                                                                                                    | 火山、航空機落下等 |          |                                  |                     |                     |
| <b>内的事象</b><br>・単一基<br>・ランダム荷重(不確実さ小)<br>・単一機器の単一故障<br>⇒多重性、冗長性は効果大                                                | ランダム      | ヒューマンエラー | ・内的事象<br>レベル1<br>PRA実施<br>基準     |                     |                     |
|                                                                                                                    | 火災        |          |                                  |                     |                     |
|                                                                                                                    | 内部溢水      |          |                                  |                     |                     |



**外的事象と内的事象のどちらが全CDFに影響するか**  
 ■全事象CDF=外的事象CDF+内的事象CDF  
 ・外的事象CDF > 内的事象CDF (10<sup>-7</sup>~10<sup>-9</sup>(1/年))  
 ・内外同時CDF≒0  
 ■外的事象では、複数機器の同時損傷が生じ得るため、AM/SAMの場合、システム対応でなく、構造物・機器で対応せざるを得ない(例えば、補強、免震化、タービンDG等多様化)

4

2011.3東北地震・津波による福島第1NPP事故からの教訓・知見

**プラント生涯のどの段階を対象とするか (立地・設計・評価・建設・運転・廃炉)**  
 ⇒ 5章リスク論に基づく津波防御の体系、11章耐津波工学の体系

■ **ハザード**: マルチハザードの取り扱い  
 ⇒ 4章原子力施設の地震・津波安全に関する性能、6章津波の外力作用

■ **プラント**: マルチプラント/共通原因故障等  
 ⇒ 4章原子力施設の地震・津波安全に関する性能、7章津波防御に関する工学の体系化、8章フラジリティ評価、10章耐津波工学関連の解析コード

■ **ヒューマン**: マルチハザード・プラント/共通原因故障下での回復措置や復旧措置等  
 ⇒ ?章

■ **防災**: 周辺住民の避難とインフラ被害、復旧措置時のインフラ整備  
 ⇒ 9章一般防災関連

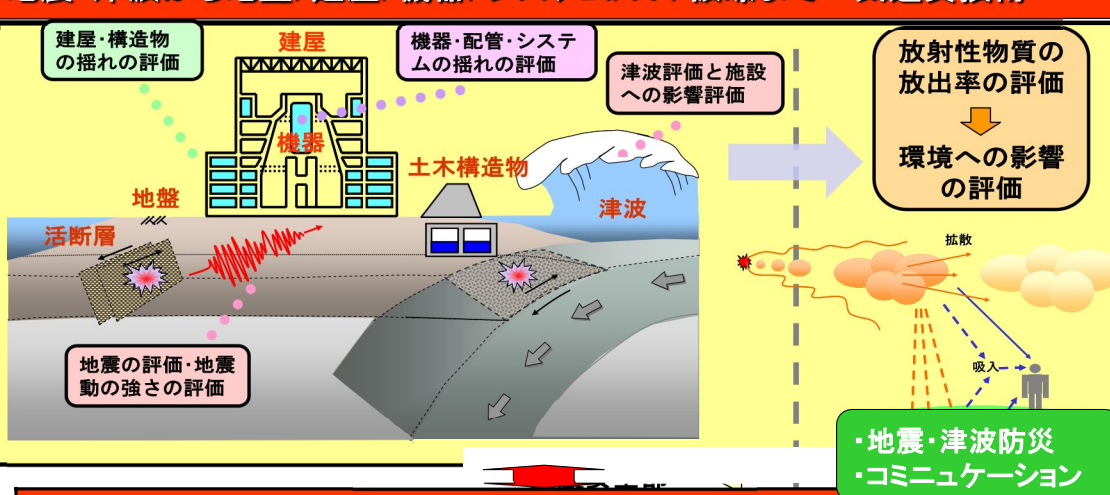
■ **原子力リスクのコミュニケーション(NRC)**: 効率的避難のための平常時/緊急時の対応、関係者間でのNRC(市民と行政・事業者/市民と専門家/専門家間)  
 ⇒ ?章

■ **人材育成・国際貢献**: 上記のための中長期に亘る人材育成、国際貢献  
 ⇒ 付録の人材育成

6

## 技術ガバナンスの重要性(4/5)

### 地震・津波から地盤/建屋/機器/システム/FP/被曝まで一貫通貫技術



・地震・津波防災  
 ・コミュニケーション

### プラント生涯に亘る対応

1. 立地
2. 設計・3. 評価
4. 建設
5. 運転
6. 廃炉

5

### 3.4.1 ハザード関連

**対象波源域**  
 ■ 近地津波  
 (1) プレート間地震  
   a) 津波地震、b) 深部地震  
 (2) 海洋プレート内地震  
 (3) 海域活断層による地殻内地震  
 (4) その他(地滑り、火山等)  
 ■ 遠地津波(例・チリ津波)

**津波水位・波形の評価**  
 ■ 波源モデルの設定 ← 3.11津波の知見反映  
 (1) 巨視的パラメータ、(2) 微視的パラメータ、(3) 破壊に係るパラメータ  
 ■ 津波水位・波形の算定  
 陸上地形モデル、サイト近傍海底地形モデル、遠地海底地形モデル、津波初期水位(=高度地殻変動)、津波伝播解析、津波水位変動、津波発生頻度解析、波源モデル

**津波発生頻度の評価**  
 ■ 津波を伴う地震活動のモデル化  
 (1) 既往の活動履歴(歴史地震、津波堆積物)  
 (2) 周期性(ポアソン過程、更新過程)  
 ⇒ 地震調査推進本部の長期評価を参照

**津波の波形、発生頻度の不確実さ評価**  
 (1) 偶発的不確実さ  
 (2) 認識論的不確実さ(ロジックツリー手法)

**津波ハザード評価**  
 H<sup>D</sup>: 設計津波水位  
 v(H<sup>D</sup>): H<sup>D</sup>の超過頻度  
 超過頻度v  
 津波強度指標(津波水位、波力、流速等)  
 関連付け

**建屋・機器の津波に対するフラジリティ評価**  
 津波強度指標(津波水位等)  
 毎層収容設備数  
 稼働

7



## ハザード関連の主な検討項目

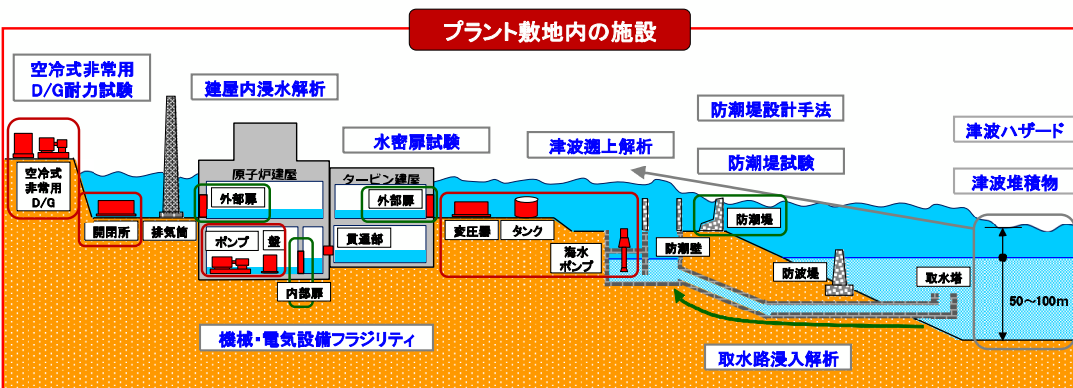
- (1) 対象とする津波起因事象及び波源の設定：  
 1) 津波起因事象：①近地津波：地震起因、海底地すべり、陸域斜面崩壊土塊の海中転動、海底火山  
 ②遠地津波：地震起因  
 2) 波 源：①波源を特定する場合  
 ・波源モデル(地震規模、地震運動、破壊時間運動、分岐断層、)  
 ・伝播モデル(海底地形データ、陸域地形モデル、)  
 ②波源を特定しない場合—津波に伴う敷地内への浸水経路を特定し得ない場合の侵入量  
 ・敷地への浸水要因及び浸水量の同定、埋設侵入経路の物理探査による検知率等
- (2) 津波の施設へ及ぼす要因：  
 ①敷地内 ②敷地外—事故シナリオ上、どの範囲まで想定するか
- (3) 基準津波レベルの違いによる事故シナリオの違い：  
 ①基準津波以下で取水ピットから海水が吹き上げる  
 ②基準津波以下で防潮堤から海水がこぼれる、防潮堤の機能確認  
 ③基準津波を少し超える：  
 ④基準津波を大きく超える：
- (4) 余震による津波の影響：・本震による津波と余震発生までの時間、余震発生の対象期間
- (5) 地震と津波の重畳：  
 ・地震ハザードと津波ハザードの相関  
 ・地震ハザードと津波ハザードの相関のSSGsフラジリティ、事故シーケンス評価への影響
- (6) 地殻変動に伴う敷地及び周辺地盤の隆起/沈降と津波との関係
- (7) その他：  
 ・漂流物ハザード(火災物の表中も含む)  
 ・タンク喪失による海面の発火  
 ・海底砂移動

## 脆弱性関連の主な検討項目

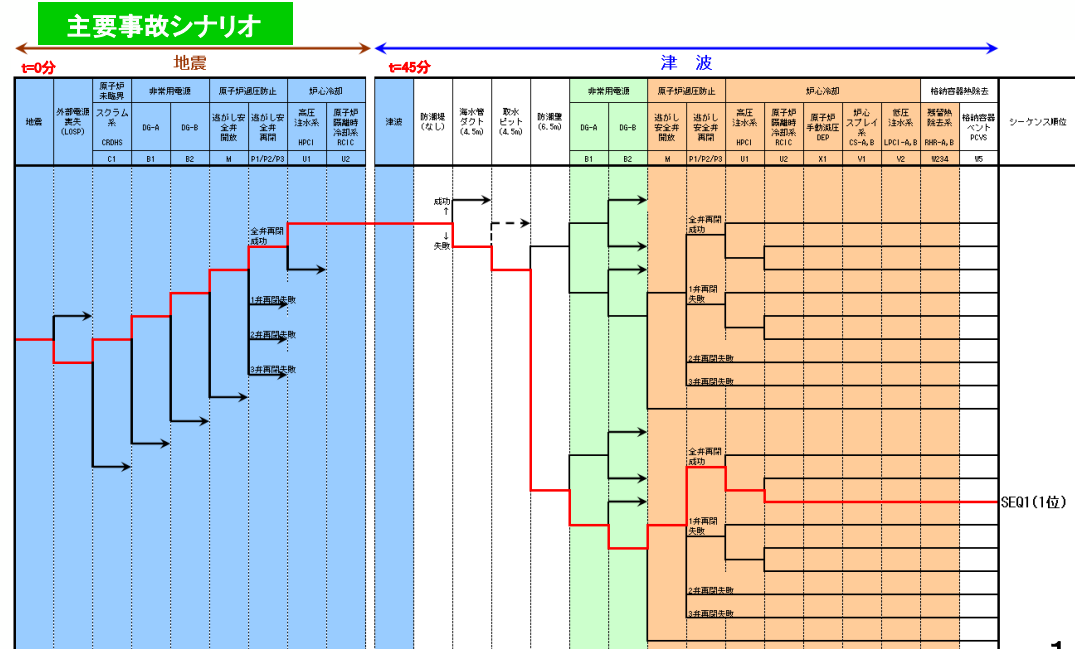
- (1) 防潮堤設計高さの炉心損傷頻度(CDF)への影響
  - 1) 高さをどこまで
    - ①基準津波に基づく設計津波より少し高い、②中程度の高さ、③かなり高い、④極めて高い
  - 2) 原子炉建屋の高さ約80mとの相対比はどこまでか
    - ①発電所敷地高さの適切性、海水ポンプ揚水高さとの関係、②女川NPPsikiti 堀炬燵式か
- (2) 建屋及び機器の水密化
  - ①建屋水密化と施設の水密化とのどちらを優先とすると効果的か
- 1) 建屋の水密化
  - ②建屋の水密化の程度： 建屋の対象毎：原子炉建屋、タービン建屋、制御建屋、熱交建屋等
  - ③建屋の水密化がほぼ完全な場合、設備の水密化の必要性
  - ④水密化機能が地震動で損傷したところに水圧で機能喪失した場合、どの程度評価し得るか
- 2) 機器の水密化の程度
  - ⑤建屋内機器の水密化を多重性の観点か、多様性の観点か
  - ⑥潜水艦方式のうち、機器毎か、部屋毎か
  - ⑦ケーブル、コネクタの水密化、劣化は
- (3) 土木構造物： 取水施設の海底砂による機能喪失
- (4) 炉心損傷前のAM対策
  - ①発電機や給水車が健全として、これらとポンプとの接続部(電源ケーブル、ダクト等)の耐力は
  - ②発電機と給水車との関係がORの場合と、ANDの場合での炉心損傷への影響
- (5) 炉心損傷後のSA対策
  - ①SA対策施設、例えば、バント関連施設(ポンプ、配管、排気塔)の津波対策の程度の影響
  - ②敷地外の人口ダムからの水路の津波対策
  - ③復旧対策—送電網の復旧資材ヤードの冠水
  - ④津波情報施設が機能喪失するかどうかの影響 等

### 3.4.2 多数基におけるプラント内の構造物・システム・機器のフラジリティ関連

- 地震・津波等外的事象に対する事故シナリオの同定では、原子力プラントの敷地内及び敷地外まで対象とする。
- 対策は、炉心損傷前のAMと炉心損傷後のSAMの両方を対象とする。
- PRA技術は、レベル1～3（ヒューマンエラーを含む）まで対象とする。
- 建屋及び機器の水密化技術については、現状の技術レベルから推定する。



### 3.4.2(1) 事故シナリオーETの例



## 防潮堤及び海水管ダクト・取水ピットの役割

## ■防潮堤の役割

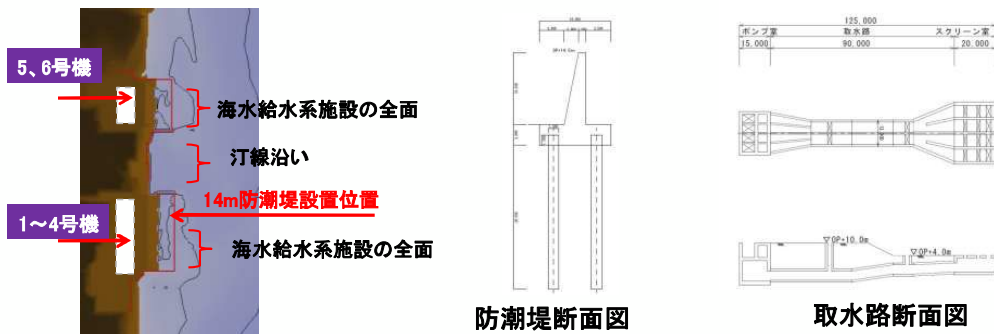
- 防潮堤は、設計水位 ( $H^D$ ) の津波に対して、敷地に津波を侵入させない高さ ( $H^{SW}$ ) とする。

$$(H^D) < H^{SW}$$

## ■海水管ダクトの役割

- 海水管ダクトは、炉心の崩壊熱の冷却のために、防波堤の海水を取水ピットへ移送する。
- 海水管ダクトを通した海水が、取水ピットに吹き出さないように、防潮壁高さ ( $H^{SAD}$ ) を設定する。  $H^{SAD}$  は、設計水位 ( $H^D$ ) 以下の津波において、取水ピット/熱交換機建屋のピット等から、海水は噴き出さないように設定する。

## 防潮堤及び海水管ダクト・取水ピットの設置位置と構造

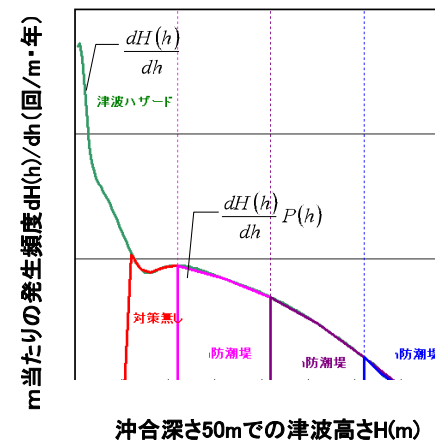


防潮堤断面図

取水路断面図

1 2

## ■防潮堤高さのCDF低減効果



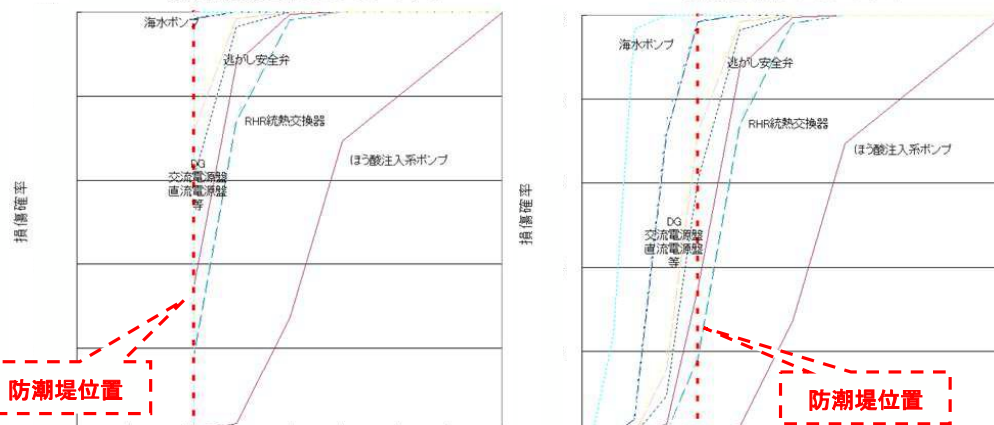
## ■防潮堤高さとCDFとの関係

| 汀線位置津波高さ | CDF | CDF<br>(防潮堤有、AM対策有)<br>/CDF<br>(防潮堤無、AM対策無) |
|----------|-----|---------------------------------------------|
| 防潮堤高     |     |                                             |
| 14 m     |     |                                             |
| 16 m     |     |                                             |
| 17 m     |     |                                             |
| 18 m     |     |                                             |
| 20 m     |     |                                             |
| 21 m     |     |                                             |
| 22 m     |     |                                             |
| 23 m     |     |                                             |
| 25 m     |     |                                             |
| 26 m     |     |                                             |
| 27 m     |     |                                             |
| 29 m     |     |                                             |
| 30 m     |     |                                             |
| 31 m     |     |                                             |
| 33 m     |     |                                             |
| 34 m     |     |                                             |
| 35 m     |     |                                             |
| 36 m     |     |                                             |
| 38 m     |     |                                             |
| 39 m     |     |                                             |
| 40 m     |     |                                             |

## 防潮堤の有無の構造物・機器フラジリティへの影響

## 防潮堤設置時のフラジリティ

## 防潮堤無しフラジリティ



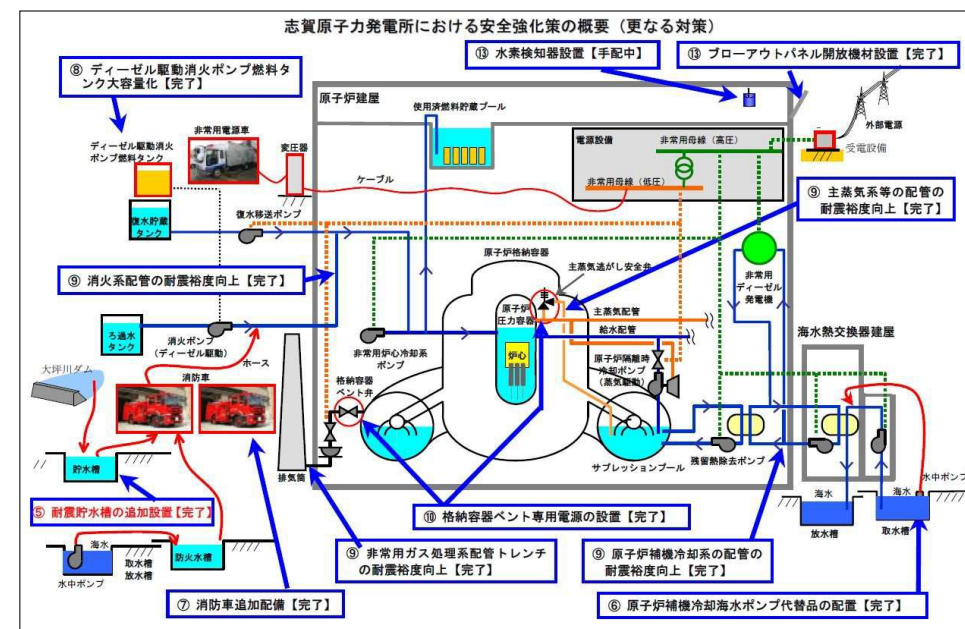
■防潮堤の有無により構造物・機器のフラジリティは相違する。

■これらフラジリティのCDFへの影響はどれ程かを、事故シナリオ上、同定する必要がある

13

## 3.4.2(3) AM対策(電源、炉心注水等)の効果

## AM例(ストレステスト志賀2号機プレス資料)

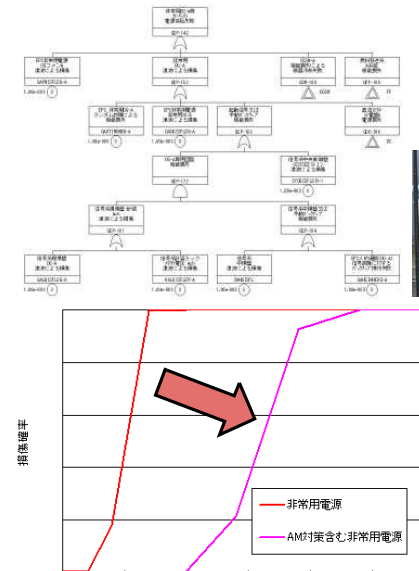


15



## AM対策のシステム機能喪失確率への影響

## (1)非常用電源:発電機

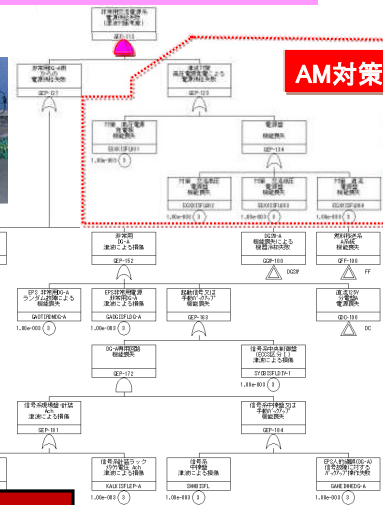


■電源のケーブルやダクト等の脆弱性評価は適切か

## (1)電源

- ・高圧発電機
- ・交流高圧電源盤、低圧電源盤、直流電源盤

## AM策込みの非常用電源



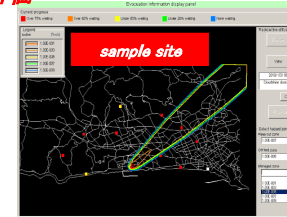
16

## 3.5 他章のに関連(一般防災/コミュニケーション)

公衆への影響は、レベル3PRAの結果、どの時間に、どの程度(距離)避難するかで大きく異なる。

## NPP敷地内

- モニタリングデータに基づく放射性物質分布評価



## NPP敷地外

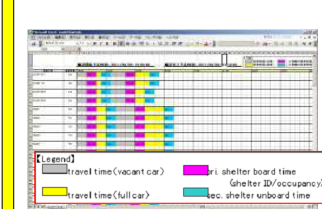
- ハザード評価



## 自治体、市民等への伝達



## ●避難輸送計画工程



輸送手段の選択

## ●自動避難ルート評価



18

## 3.4.4 情報通信手段の喪失

## 平常時緊急時両用機能を有する地震情報伝達システム



## 原子力リスクのコミュニケーションの例

—IAEA国際情報伝達に関するワークショップ(2011.12,新潟工大)—



IAEA



基調講演



地元市民



地元自治体



地元メディア



市民・専門家によるパネルディスカッション

- 市民と専門家間、専門家間の認識の有り方
- 「今は同意していないという状態であることに同意する(agree to disagree)」の認識が重要
- 「不毛の対立を超えて意義のある不一致」の実現が必要

19

## 付録 国際貢献・人材育成の例

- ・JNESはIAEA/ISSCの基準策定において、9のWA(ワーキングエリア)を提案し、ドナー会議にて6WAのリーダー機関として合意され、基準の骨子/執筆の役割分担/工程等を運営している。
- ・同活動を通し、JNESを含む国内の安全研究成果をIAEA基準へ反映する枠組みを確立した。
- ・アジア・中近東国を対象とした国際耐震研修を通じた日本耐震技術・IAEA基準の普及
- ・IAEA基準作成を通し、国際人としての人材育成

JNESの提案したテーマは、WA1,2,3,4,5,8,9,10の活動に包含。朱書きは、JNESがリーダー機関となっているWA

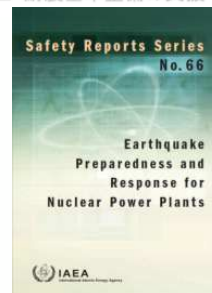
### ワーキングエリア(WA)

|    |                               |
|----|-------------------------------|
| 1  | 地震ハザード(3000m深部鉛直アレー地震動観測システム) |
| 2  | 耐震設計                          |
| 3  | 地震PRA(リアルタイム自動スクラムを含む)        |
| 4  | 耐震設計を超えた場合のプラント健全性評価          |
| 5  | 津波ハザード、津波PRA, TIPEEZ          |
| 6  | 火山ハザード                        |
| 7  | サボタージュ                        |
| 8  | マルチハザード、マルチユニットに対するリスク評価      |
| 9  | 関連情報の共有と情報伝達システム              |
| 10 | コミュニケーション、教訓・技術の普及            |



ドナー会議風景  
(議長: JNES職員)

### ■ 耐震基準整備の支援



・IAEA基準WAの主査: 大学・JNES職員    ・執筆者: 大学・研究機関・産業界