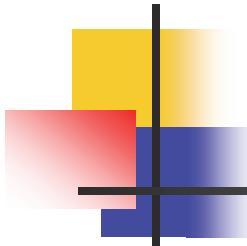


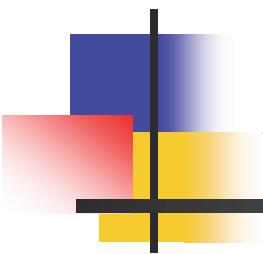
外的ハザードへの対応

名古屋大学 工学研究科 山本章夫

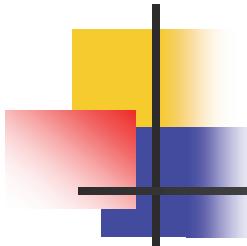


概要

- 東日本大震災とその教訓
- 外部ハザードの評価
 - 既存評価方法の調査・整理
 - 国内に適用できる定性的評価方法の検討
 - 定性的評価方法の適用検討
 - 外的事象PRAの実施手法

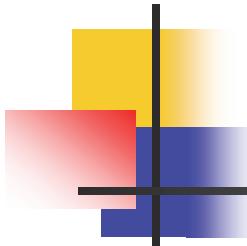


東日本大震災とその教訓



地震の影響(1)

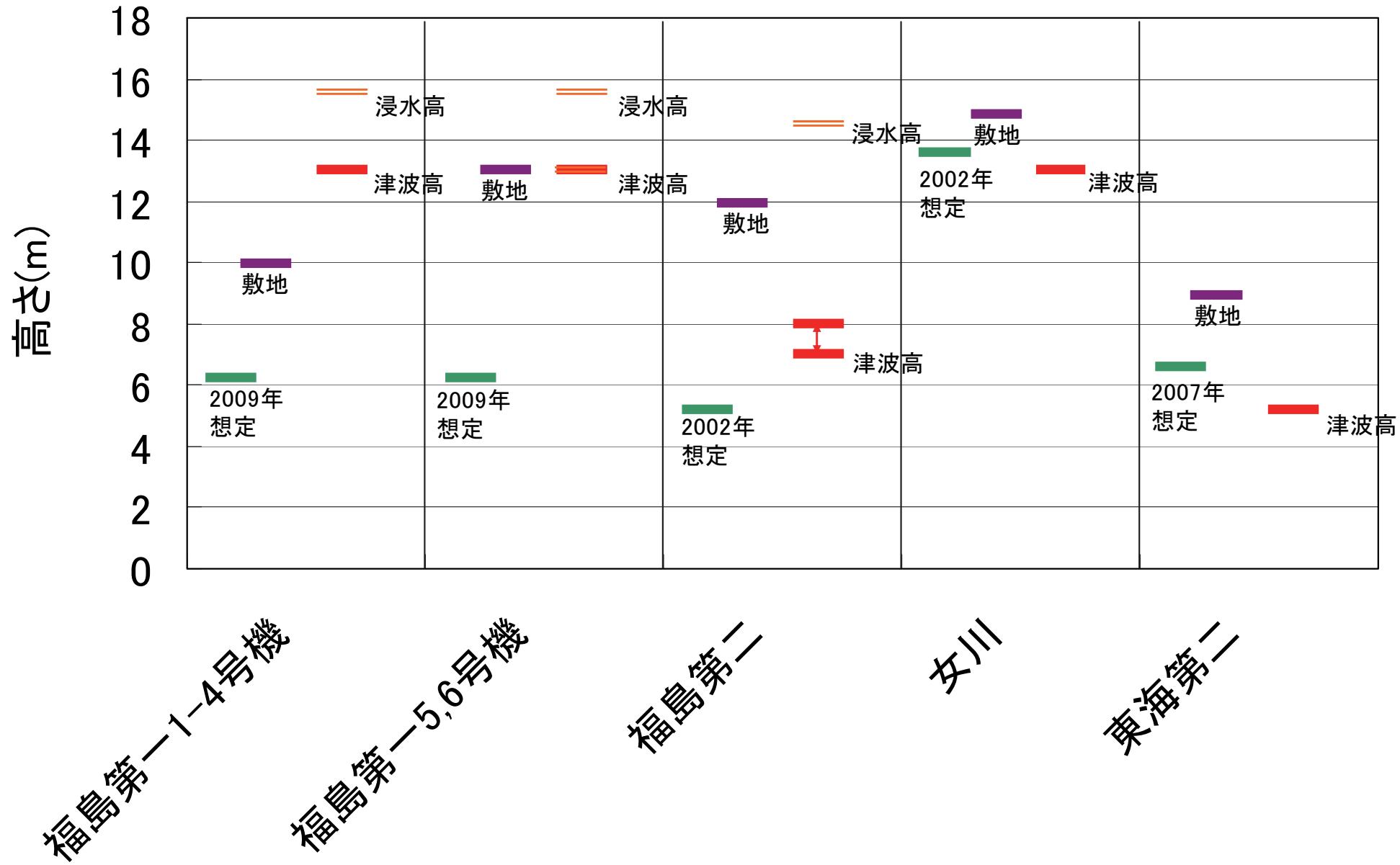
- 福島第一原子力発電所
 - 最大加速度はSsを最大3割程度超過
 - 外部電源喪失
 - 1-3号機は、重要機器を直接確認することが困難であるため、温度・圧力などのプラントデータ、観測された地震動を用いた応答解析、立ち入り可能な部分におけるウォークダウンなどにより影響が評価されている
 - 上記の評価から、安全機能に深刻な影響を与える損傷はないと推定される
 - 一方、温度、圧力などのプラントデータからは読み取れない微少漏えいについては、現場調査ができないことから現時点では確認が困難。重要機器について、今後の調査が必要
- 福島第二原子力発電所
 - 最大加速度はSs未満
 - 外部電源喪失せず
 - プラントデータ、点検などにより、安全機能に深刻な影響を与える損傷はないと評価されている
- 女川原子力発電所
 - 最大加速度はSsを最大1割程度超過
 - 外部電源喪失せず
 - 常用系の高圧電源盤が地震動の影響により焼損
 - プラントデータ、点検などにより、安全機能に深刻な影響を与える損傷はないと評価されている

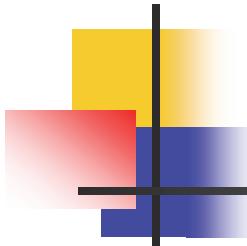


地震の影響(2)

- 東海第二原子力発電所
 - 最大加速度はSs未満
 - 外部電源喪失
 - プラントデータ、点検などにより、安全機能に深刻な影響を与える損傷はないと評価されている
- (参考:2007年中越沖地震)柏崎刈羽原子力発電所
 - 最大加速度はS2の最大3倍程度
 - 外部電源喪失せず
 - プラントデータ、点検などにより、安全機能に深刻な影響を与える損傷はないと評価されている
- (参考:2005年宮城県沖地震)女川原子力発電所
 - 一部の周期帯でS2を超過
 - 外部電源喪失せず
 - プラントデータ、点検などにより、安全機能に深刻な影響を与える損傷はないと評価されている
- (参考:2005年能登半島地震)志賀原子力発電所
 - 一部の周期帯でS2を超過
 - 外部電源喪失せず
 - プラントデータ、点検などにより、安全機能に深刻な影響を与える損傷はないと評価されている
- 東日本大震災は、地震と外部電源喪失(+津波)が重なった初めてのケース

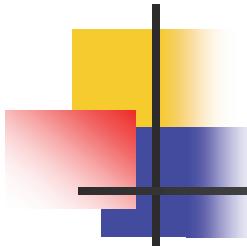
津波高さの比較





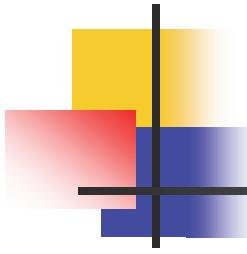
津波の影響

- 福島第一原子力発電所
 - 設計基準の津波高さを大幅に超える津波
 - 多くの安全機能が同時に喪失、1-4号機は過酷事故に至った
- 福島第二原子力発電所
 - 設計基準の津波高さを大幅に超える津波
 - 安全機能の一部が喪失したが、AM策および機器の復旧により冷温停止に至った
- 東海第二原子力発電所
 - 設計基準の津波高さを超える津波
 - 一部のDGが機能喪失したが、計画通りの対応で冷温停止に至った
- 女川原子力発電所
 - 設計基準の津波高さを超えてなかった
 - 溢水により一部のDGが機能喪失したもの、計画通りの対応で冷温停止に至った



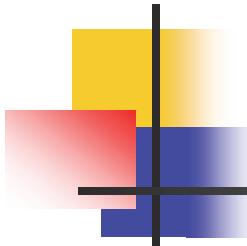
反省点と教訓(全般)

- 外的ハザードに対する包括的な評価(Individual Plant Examination for External Event, IPEEE)が実施されていなかった
 - 内的ハザードがPRAにより包絡的・定量的に把握されていたのに比べ、外的ハザードのリスクは包絡的・定量的に把握されていなかった
 - 外的ハザードに対するプラントの脆弱性を把握できていなかった。特に外的ハザードによってはクリフェッジが存在することへの認識が不十分であった
 - クリフェッジを超えたときのプラント拳動の考慮およびそれに対する対応が不十分であった
 - 外部ハザードの多い国内でIPEEEが実施されてこなかつたこと自体が問題
- 外的ハザードの重畠が十分に検討されていなかった
 - Coincidental(偶然)、Consequential(従属)、Correlated(相関)の三つのパターン
- 従来の安全評価は、プラント内部を対象としており、外的ハザードが複数基立地サイトおよびサイト外に及ぼす影響が十分に検討されていなかった
 - 複数基の同時被災が事故対応に与える影響
 - 長時間にわたる全電源喪失
 - 津波や地震によるオフサイトセンターの機能喪失
 - 道路網の寸断が外部支援に与える影響
- 従来の安全評価は、設計基準までの外的ハザードを対象としており、クリフェッジの存在とその影響が十分に把握されていなかった



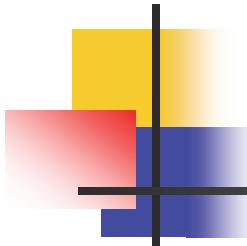
反省点と教訓(地震動)

- 観測された最大加速度がSsを超過
 - 「観測された最大加速度がSsを超過する確率」を考えると、設計基準地震動の設定の妥当性を確認する必要がある
- 地震については、中越沖地震を含め設計基準の超過を経験
 - 2006年の耐震指針改訂時に「残余のリスク」があることを認識し、これができるだけ低減する措置が求められた
- 耐震設計・影響評価に含まれる大きな安全余裕の存在
 - 設計で用いられている評価と最適評価の差異
 - 設計基準値と実耐力の差異
- 地震動はプラント全ての機器に同時に影響を与える
 - 深層防護の各層で耐震設計を考慮。
 - 大きな安全余裕とあいまってクリフェッジが顕在化しにくい要因と見られる。
- 地震動は安全機能に深刻な影響を与えていないと推定されており、上記の安全余裕がプラントの安全確保に寄与したと見られる
- 一方で、設計基準の位置づけを考えると、「安全余裕があるから良い」とはならない。



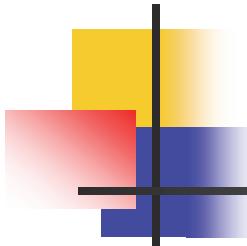
反省点と教訓(津波)

- 観測された津波が設計基準津波を大幅に上回った
 - 設計基準津波の設定を見直す必要がある
- 津波については、設計基準の超過の可能性およびその場合の影響や対応について、議論されてこなかった
 - 津波も、残存するリスクをできるだけ低減する取り組みが重要
- 「津波随伴事象」が十分に考慮されてこなかった
 - 例：津波に伴って発生したがれきなどにより、事故対応に大きな支障が発生
- 耐津波設計・影響評価に含まれる安全余裕が地震の場合に比べると十分でなかった
- 津波はプラント外部から内部に向かって順に影響を与える→プラントの外部で阻止する考え方
 - 深層防護の各層で耐津波設計は考慮されず
 - 津波高さがある値を超えるとクリフィエッジが顕在化しやすい



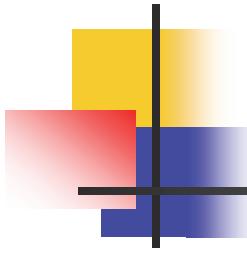
外的ハザードに対するリスク評価

- 種々の外的ハザードを包絡的に検討する必要性
 - 米国IPEEEの例: 地震、火災、強風(台風、竜巻)、洪水、雪崩、火山、氷結、高温、低温、近隣の輸送・工場、航空機落下など
- リスク要因となり得る外的ハザードに対して、定性的リスク評価、定量的风险評価(PRA等)を用いて影響評価を実施し、プラントの脆弱性を評価、これらに対応する。
 - リスク、設計上の余裕を考慮したプラントへの影響度、時間的余裕、ハザード源とプラントの距離などを考慮
 - 外的ハザード評価の不確かさを考慮
 - 継続的改善



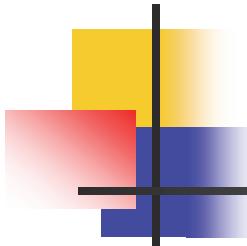
外的ハザードへの対処の考え方

- 外的ハザードへは、設計基準を十分な信頼性を持って設定するだけでは不十分であり、外的ハザードの評価における不確かさを考えると、設計基準を超えた場合の対処をあらかじめ準備する必要がある
- 問題点は以下の通り
 - 設計基準をどのように決めるか
 - 外的ハザードが設計基準を超える可能性にどう対処するか



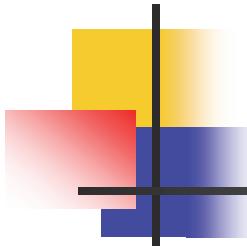
外的ハザードの設計基準の設定

- 設計基準は、性能目標と整合する形でハザードカーブなどを考慮して設定する
- 性能目標(案)はCDF: 10^{-4} [1/y]
 - 年超過確率と安全対策が相まってリスクを性能目標に見合った値とする必要がある。
 - 基準津波設定にあたっては、数百年程度の歴史津波を考慮してきた→ $10^{-2} \sim 10^{-3}$ [1/y]。安全対策を含め、性能目標との整合性が十分でなかった可能性あり。
 - 外的ハザードの設計基準は、関連学会で検討される場合があり、その場合、原子力安全の関係者との密なコミュニケーションが不可欠である。
 - 外的ハザード評価技術の成熟度などを考慮する必要



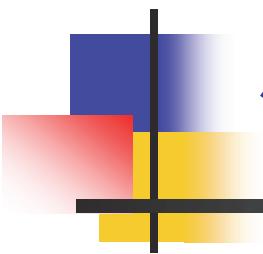
外的ハザードの不確かさへの対処

- 不確かさには、安全余裕と深層防護により対処
 - ストレステストの手法などにより安全余裕を確認・確保
 - 設計基準を超える外的ハザードを考慮する形で深層防護に則った安全設計・対策を行う
 - 外的ハザードは、その大きさにより、深層防護の複数の層を同時に破る可能性があることから、*independent effectiveness*(発揮できる効果の性質が独立)の考え方方が重要
- 例えば
 - 耐津波設計
 - 敷地内への浸水を防ぐ
 - 建屋への浸水を防ぐ
 - 重要機器室への浸水を防ぐ
 - 高台に設置・保管した代替設備などによる対応
 - 耐震設計
 - 「機器に対する影響の出方」の多様性を高めるため、免震構造や設置方向の多様性などの種々の耐震の考え方を導入
 - 可搬型の代替設備などによる対応



小括

- 外的ハザードの包絡的評価の必要性
 - IPEEEの実施とプラント脆弱性の把握、継続的改善
 - 複数基立地、サイト外の影響を含めた包絡的評価
- 外的ハザードに対する設計基準設定の考え方
 - 性能目標と整合する形でハザードカーブなどを考慮して設定
 - 関連学会とのコミュニケーション
 - 外的ハザード評価手法の成熟度の考慮
- 設計基準を超える外部ハザードに対する対応
 - 安全余裕の評価
 - 深層防護に則った安全設計



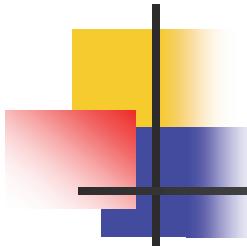
外部ハザードの評価

注: 以降の資料は、日本原子力学会2012年秋の大会 標準委員会セッション 4 「リスク評価とPRA基準の開発計画」における発表を参考としている。

<http://www.aesj.or.jp/sc/comittees/c-etc2-3.html>

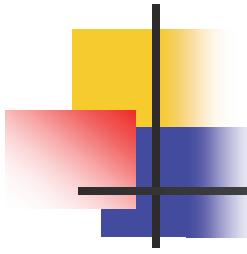
http://www.aesj.or.jp/sc/comittees/gijiroku/etc/2012a_sc_session4_1.pdf

http://www.aesj.or.jp/sc/comittees/gijiroku/etc/2012a_sc_session4_2.pdf



外的ハザード事象評価の分類手法の検討

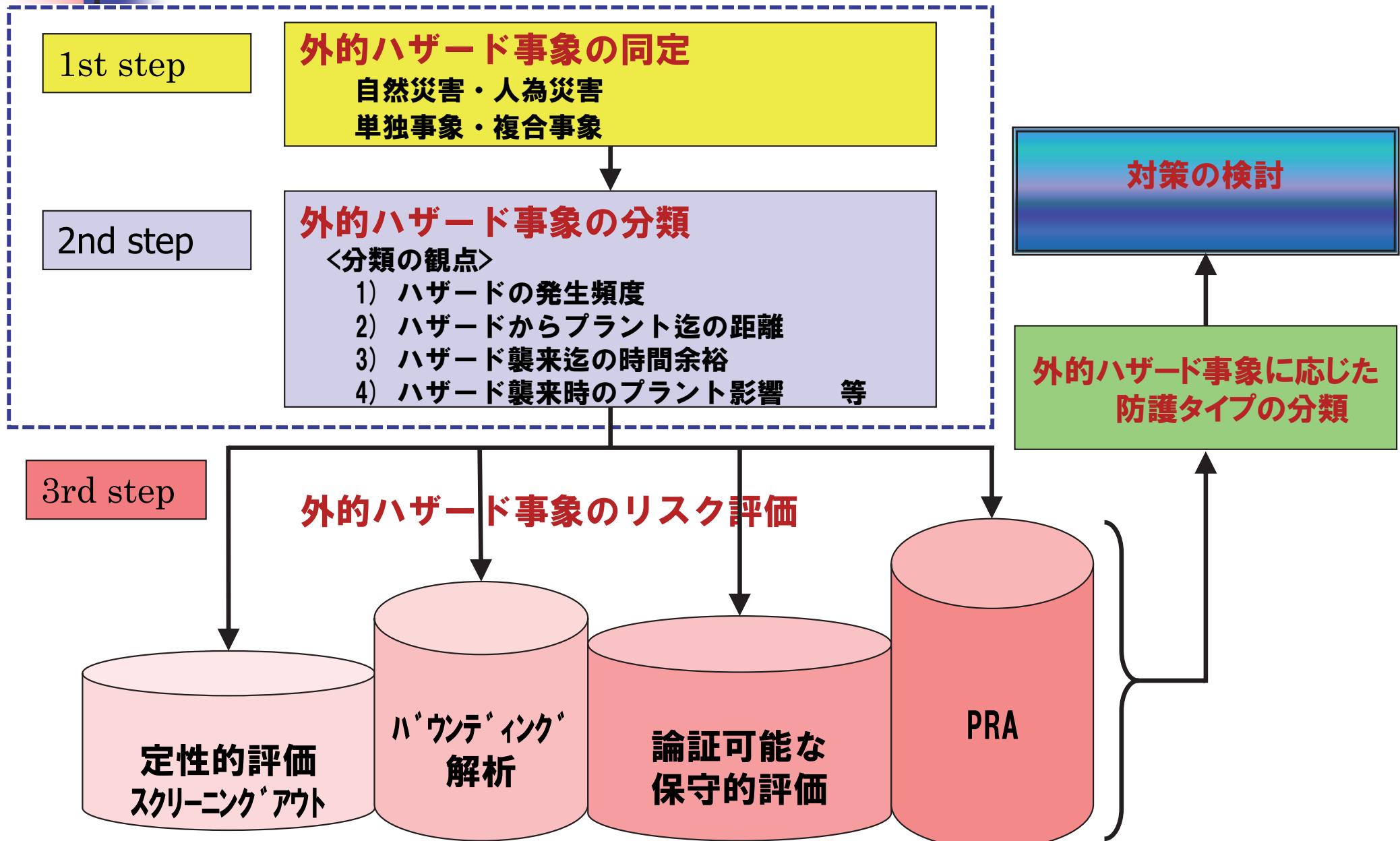
- 既存評価方法の調査・整理
- 国内に適用できる定性的評価方法の検討
- 定性的評価方法の適用検討
- 課題・今後の展開

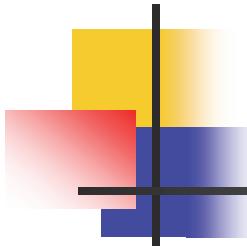


検討の背景

- 平成23年3月11日に発生した東北大震災の影響による福島事故は、地震並びに津波に起因するリスク評価の重要性があからさまとなつた。
- これらの外的ハザードの定量的評価実施にも大きな検討課題はあるが、同時に、従来から有意なリスクがあると想定していなかつたその他の外的ハザード事象に対しても、定性的評価を含めてその評価を実施して、リスク影響の有無を判断していくことが必要である。
- この外的ハザード事象に対する評価・判断は、今後の外的事象PRA実施基準の策定に対して、その優先順位付け等の有用な情報を与えることが期待される。

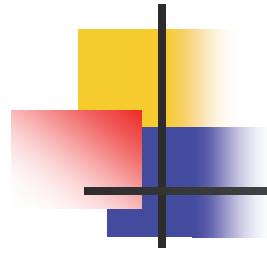
外的ハザード事象評価の全体構想





検討内容

- 外的ハザードによる潜在的危険性を特定し、リスク影響の大きい有意な外的ハザードを網羅的且つ合理的に抽出する外的ハザード事象の評価方法につき、既存評価方法の調査・整理を実施する。
- 外的ハザード事象の評価方法のうち、以下の定性的評価方法について、国内で適用可能な方法を検討する。
 - 外的ハザード事象の同定
 - 外的ハザード事象の分類
- 国内プラントを対象とした外的ハザード事象の定性的評価方法の試評価を実施して適用性をみる。



1. 既存評価方法の調査・整理

外的ハザード評価に関する既存評価方法(1/3)

<米国Independent Plant External Event Evaluation, IPEEEにおけるハザード評価>

ハザードグループ	外的事象	評価手法
内部ハザード	内部火災	<ul style="list-style-type: none">・火災PRA手法 (NUREG/CR-2300、NUREG/CR-2815、NUREG/CR-4840、NUREG/CR-5259)
		<ul style="list-style-type: none">・FIVE手法 (EPRI)
外部ハザード	地震	<ul style="list-style-type: none">・地震PRA手法 (NUREG/CR-2300、NUREG/CR-2815、NUREG/CR-4840)
		<ul style="list-style-type: none">・耐震裕度評価手法 (NRC手法／EPRI手法)
	強風及び竜巻	<ul style="list-style-type: none">・下記の段階的スクリーニングを実施して、重要な事象かどうかを判断する。
	外部洪水	<ul style="list-style-type: none">①標準審査指針 (SPR) の評価基準に適合すれば、スクリーンアウト
	輸送及び周辺施設での事故	<ul style="list-style-type: none">②ハザード発生頻度と条件付炉心損傷確率の組合せによる評価が、下記を満たせばスクリーンアウト<ul style="list-style-type: none">－ ハザード発生頻度 $< 10^{-5}/\text{炉年}$－ 条件付炉心損傷確率 $< 10^{-1}/\text{炉年}$－ ハザード発生頻度と条件付炉心損傷確率の組合せ $< 10^{-6}/\text{炉年}$
		<ul style="list-style-type: none">③保守的なバウンディング解析による評価が、下記を満たせばスクリーンアウト<ul style="list-style-type: none">－ ハザードが炉心損傷を引き起こさない－ 炉心損傷頻度 $< 10^{-6}/\text{炉年}$
	雷	<ul style="list-style-type: none">④スクリーンアウトされない事象についてはPRAを実施 (NUREG/CR-2300、NUREG/CR-2815、NUREG/CR-5259)
	火山活動	<ul style="list-style-type: none">・活火山の近傍に位置するサイトのみ (NUREG/CR-5024 Suppl. 2)

外的ハザード評価に関する既存評価方法(2/3)

<ASME/ANS PRA Standardにおけるハザード評価>

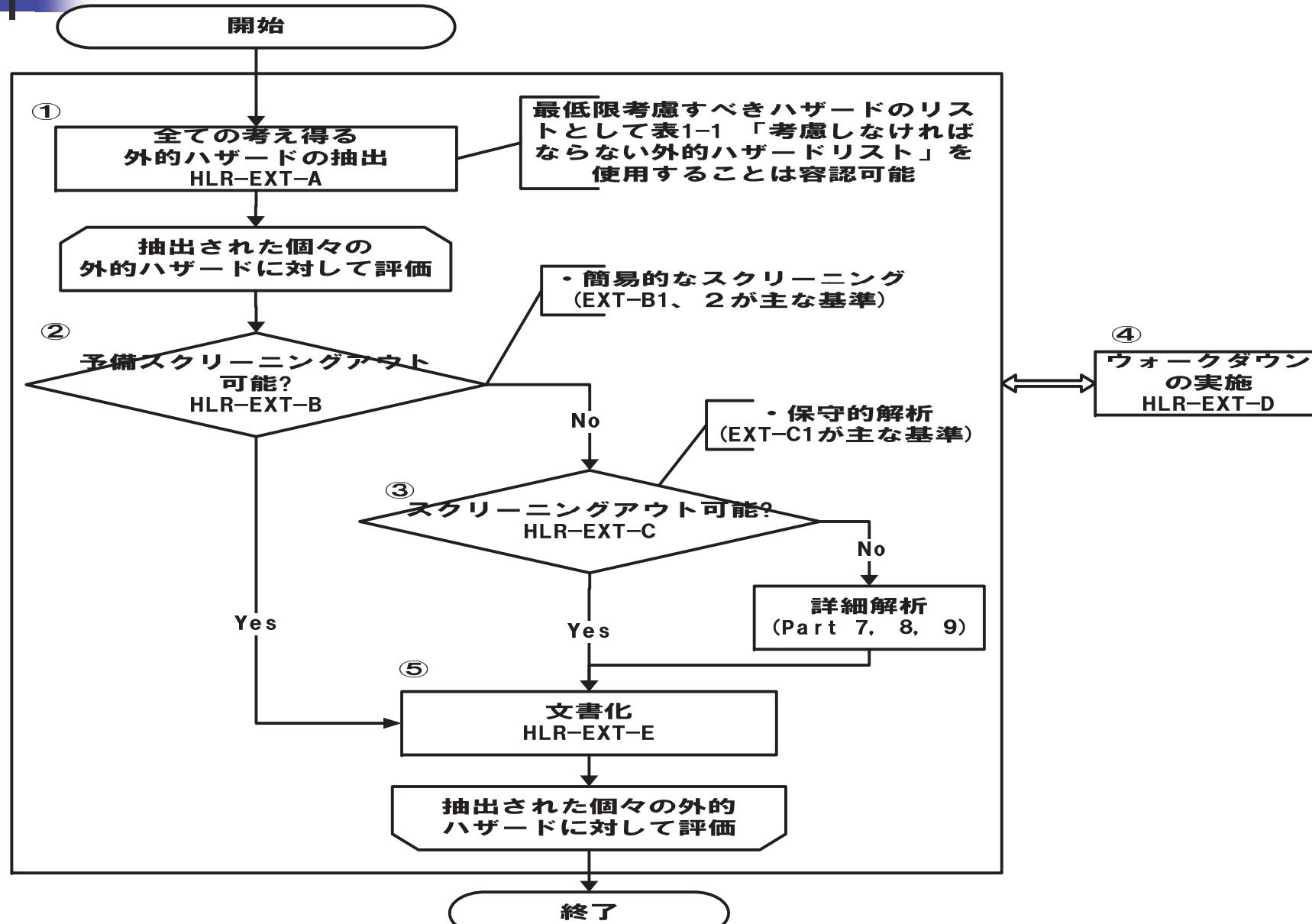
ハザードグループ	外的事象	評価手法
内部ハザード	内部溢水	<ul style="list-style-type: none">下記の手順で実施（内部溢水PRAのための特別な評価手法なし） ①プラントの分割、②溢水源の特定と特徴付け、③シナリオの設定、 ④内部溢水誘発起因事象、⑤事故シーケンス及び定量化
	内部火災	<ul style="list-style-type: none">火災PRA手法 (EPRI/NRCのNUREG/CR-6850)
		<ul style="list-style-type: none">火災PRA手法 (EPRI)
		<ul style="list-style-type: none">FIVE手法 (EPRI)
		<ul style="list-style-type: none">火災防護に係る重要度決定プロセス手法 (NRCのFPSTD-P)
外部ハザード	地震	<ul style="list-style-type: none">地震PRA手法 (NUREG/CR-2300、NUREG/CR-2815、NUREG/CR-4840、EPRI TR-103959他)
	その他の 外部ハザード共通	<ul style="list-style-type: none">スクリーニング及び保守解析 ①定性的な予備スクリーニング ②保守的なバウンディング解析 (IPPEEの段階的スクリーニングと同様の手法)スクリーニングアウトされない事象は下記の手法により解析
		<ul style="list-style-type: none">地震PRAと類似の手法を適用 (NUREG/CR-2300、NUREG/CR-2815、NUREG/CR-4458他) ①強風ハザード解析、②強風フラジリティ解析、③強風プラント応答解析
		<ul style="list-style-type: none">その他の事象のPRAと同様の手法 (NUREG/CR-2300、NUREG/CR-2815、NUREG/CR-5477他) ①外部洪水ハザード解析、②外部洪水フラジリティ解析、③外部洪水プラント応答解析
		<ul style="list-style-type: none">下記の3手法を適用したPRA解析 (NUREG/CR-2300、NUREG/CR-2815他) ①外部ハザード解析、②外部ハザードフラジリティ解析、 ③外部ハザードプラント応答解析
	航空機落下	<ul style="list-style-type: none">上記のPRA手法
		<ul style="list-style-type: none">DOEのPRA標準 (ハザード施設への航空機の衝突についての解析)

外的ハザード評価に関する既存評価方法(3/3)

<IAEAのレベル1 PSA実施ガイダンスにおけるハザード評価>

ハザードグループ	外的事象	評価手法
ハザード共通		<ul style="list-style-type: none"> ・ハザードのスクリーニング <ul style="list-style-type: none"> ①スクリーニング基準の設定（定性的、定量的）、②定性的スクリーニング ③定量的スクリーニング（発生頻度、重要なパラメータ） ・下記のハザードはスクリーンアウトしない <ul style="list-style-type: none"> - 内部ハザード：すべてのハザード - 外部ハザード：地震ハザード、強風ハザード、人為ハザード ・スクリーニングアウトされない事象は、下記の手法により解析
内部ハザード	内部ハザード共通	<ul style="list-style-type: none"> ・下記の定量的評価 <ul style="list-style-type: none"> ①バウンディング評価によるスクリーニング ②スクリーンアウトされないハザードの詳細解析 ・バウンディング評価及び詳細解析は、一貫した下記の手順で実施（内部ハザードPRAのための特別な評価手法なし） <ul style="list-style-type: none"> ①プラント情報の収集、②ハザード解析、 ③内的事象のレベル1PRAと内部ハザードのレベル1PRAとの統合、 ④定量的／定性的解析、⑤内部ハザードのCDFへの寄与の定量化
	内部火災	<ul style="list-style-type: none"> ・下記の手順で実施（内部火災PRAのための特別な評価手法なし） <ul style="list-style-type: none"> ①データ収集、②火災区画の解析、③火災PRA機器の選定、④影響によるスクリーニング、 ⑤CDFへの寄与によるスクリーニング、⑥火災の詳細解析、⑦内部火災リスクの定量化
	内部溢水	<ul style="list-style-type: none"> ・下記の手順で実施（内部溢水PRAのための特別な評価手法なし） <ul style="list-style-type: none"> ①データ収集及び内部溢水の可能性評価、②溢水シナリオの特定、 ③影響によるスクリーニング、④CDFへの寄与によるスクリーニング、 ⑤溢水の詳細解析、⑥内部溢水によるリスクの定量化
外部ハザード 共通	地震・強風・外部洪水 その他の自然ハザード 人為ハザード	<ul style="list-style-type: none"> ・下記の手順で実施（外部ハザードPRAのための特別な評価手法なし） <ul style="list-style-type: none"> ①外部ハザードのバウンディング解析、②外部ハザードのパラメータ化、 ③外部ハザードの詳細解析、④外部ハザードの頻度評価、 ⑤構造物及び機器のフラジリティ解析、⑥外部ハザードのレベル1PRAへの統合

ASME/ANS標準の外的ハザード評価(1/2)



【1】出典: 倉本孝弘, 日本原子力学会2012年秋の大会 標準委員会セッション, 4 「リスク評価とPRA基準の開発計画」発表資料

ASME/ANS標準の外的ハザード評価(2/2)

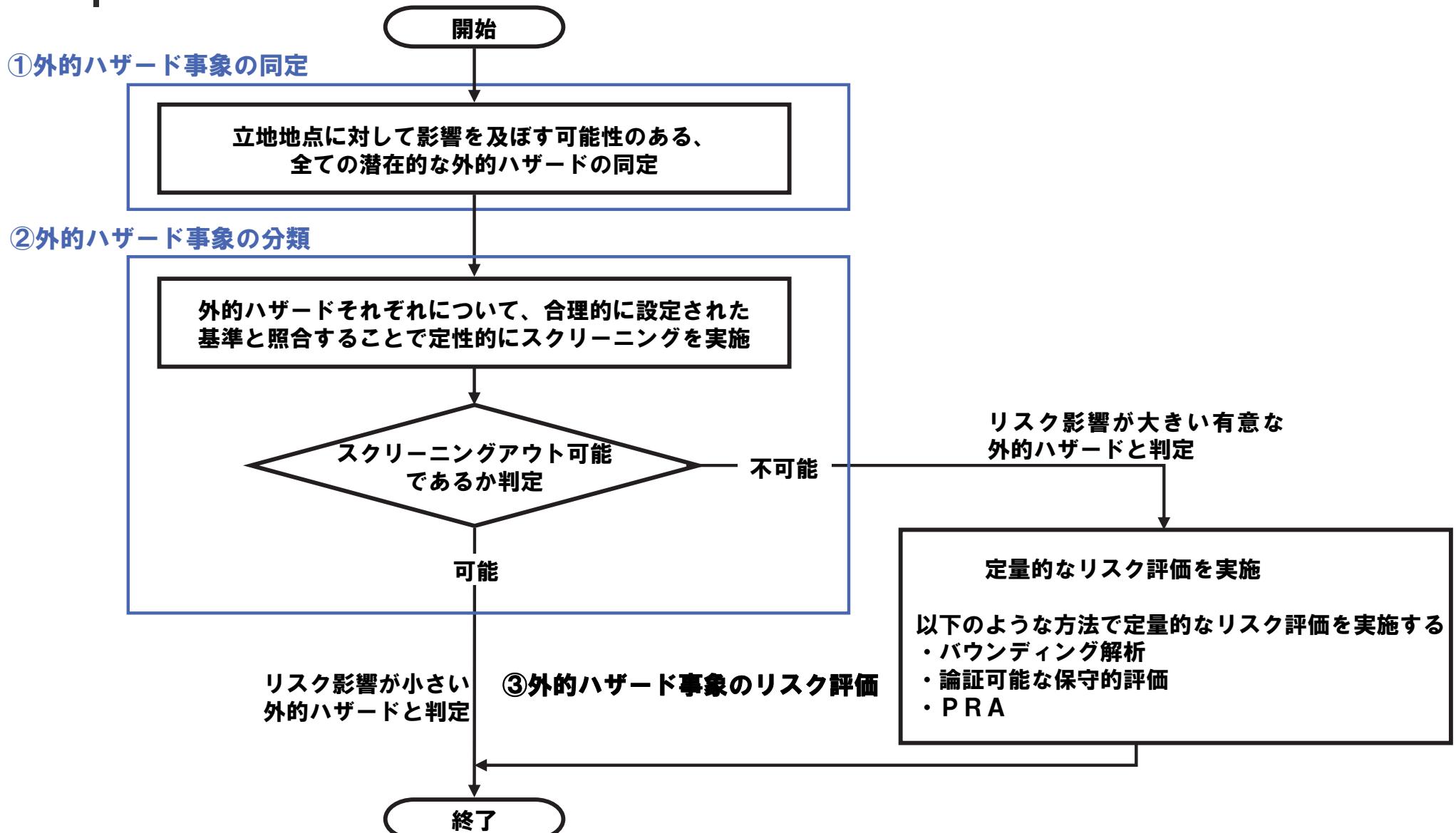
<High Level Requirements>

- ①立地地点に対して影響を及ぼす可能性のある、全ての潜在的な外的ハザード(すべての自然及び人為的ハザード)を同定しなければならない。
【HLR-EXT-A】
- ②予備スクリーニングを行う場合には、定義されたスクリーニング基準のセットを使って実施されなければならない。
【HLR-EXT-B】
- ③スクリーニングのために、バウンディング解析、又は保守的であると論証可能な解析を実施する場合には、定義された定量的なスクリーニング基準を使って実施されなければならない。
【HLR-EXT-C】
- ④外的ハザードのスクリーニングアウトの根拠は、プラント及びその周辺のウォータダウンを通じて、裏付けなければならない。
【HLR-EXT-D】
- ⑤外的ハザードのスクリーニングアウトに関する文書化は、適用すべきサポート要求と矛盾があつてはならない。
【HLR-EXT-E】



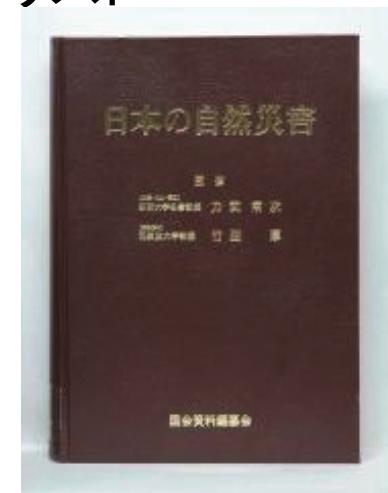
2. 国内で適用できる定性的評価方法の検討

外的ハザードの分類の評価フロー



①外的ハザード事象の同定

- 潜在的な外的ハザード事象を、可能な限り網羅的に同定する事が必要。
→国内において利用可能な潜在的な外的ハザードリスト
 - ✓ **自然災害**
 - ✓ **人為災害**
- 以下の国内外文献に記載のある自然災害を調査・整理し、外的ハザードリストを作成した。
 - ✓ **日本の自然災害(国会史料編纂会)**
西暦416年～1995年迄に発生した主要な自然災害が、2次災害を含めてまとめられている。
 - ✓ **ASME/ANS標準、IAEA NS-R-3**
考慮すべき潜在的な外的ハザード(自然災害・人為災害)が、示されている。



潜在的な外的ハザード事象リスト

外的ハザードの種類		外的ハザード				
自然災害	地震・津波災害	・地震動 ・液状化現象 ・洪水	・地盤沈下 ・地滑り ・津波	・地盤隆起 ・土石流 ・火災	・地割れ ・山崩れ	・泥湧出 ・崖崩れ
	火山災害	・火山弾 ・火碎サージ ・山林火災 ・熱湯	・火山礫 ・爆風 ・火山ガス滞留 ・地震	・火砕流 ・降灰 ・火山ガスによる冷害 ・山体崩壊（崩落）	・溶岩流 ・洪水	・土石流 ・津波
	気象災害	・暴風（風） ・ <u>暴風による砂嵐</u> ・豪雨（浸水） ・豪雨による鉄砲水 ・豪雨による崖崩れ ・豪雪による荷重 ・豪雪による洪水 ・落雷（電流） ・ <u>海水による川の閉塞</u> ・高温	・暴風による火災 ・風浪／高波 ・豪雨による洪水 ・豪雨による山崩れ ・高潮 ・豪雪による雪崩 ・融雪による山崩れ ・落雷による火災 ・湖もしくは川の水位下降 ・低温（氷結）	・暴風による雪崩 ・海水位の異常な上昇 ・豪雨による土石流 ・豪雨による地滑り ・静振 ・吹雪 ・融雪による地滑り ・降雹 ・ <u>湖もしくは川の水位下降</u> ・海流異変（原因是黒潮）	・暴風による雪崩 ・海水位の異常な上昇 ・豪雨による土石流 ・豪雨による地滑り ・風津波 ・霧 ・吹雪 ・融雪による地滑り ・霜 ・竜巻 ・干魃	
	その他の災害	・森林火災 ・満潮	・海岸浸食 ・毒性ガス	・生物学的事象 ・河川の流路変更	・隕石	
人為災害		・航空機落下 ・タービンミサイル ・パイプライン事故 ・油流出 ・治水構造物の破損	・人工衛星 ・産業又は軍事施設事故 ・ボーリング工事の影響によるガス異常噴出 ・サイト内の貯蔵庫からの化学物質放出 ・による洪水及び波	・輸送事故	・船舶の衝突	

下線は、ASME/ANS標準、IAEA NS-R-3で示されており、リストアップしたハザード

②外的ハザード事象の分類

- ①の外的ハザード事象それぞれについて、下記基準による評価(○×)を実施する。不確実さが大きい判断となる場合には△と評価する。

【基準1】当該のハザードは既存のPRAにおいて評価される事象か

【基準2】既存評価(設置許可申請等)結果を利用して、プラントの安全性が損なわれることがないことが確認できるか

【基準3】発生頻度が極めて小さいことが明確か

【基準4】当該のハザードの影響が及ぶ範囲内に、プラントが存在しないことが確認できるか

【基準5】当該のハザードが進展していくタイムスケールが、プラントの寿命に比べて十分長いか

【基準6】ハザードが到達したと想定しても、炉心損傷につながる起因事象を引き起こさないことが明らかか



- 基準との照合状況に基づき、外的ハザード事象を分類する。

A: 基準2～6のいずれかが○ → 定量的リスク評価不要

B: 基準2～6には○はないがいずれかが△ → 不確実さを確認の上で判断を行う

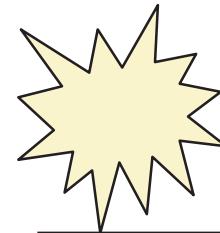
C: 基準いずれにおいても× → 定量的リスク評価要

外的ハザード事象の分類の観点

基準3

①【発生】

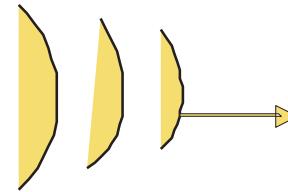
外的ハザードの発生



基準4

②【到達】

外的ハザードの到達



基準5

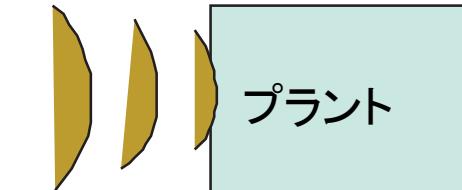
③【時間余裕】

外的ハザードのプラントへの影響

基準6

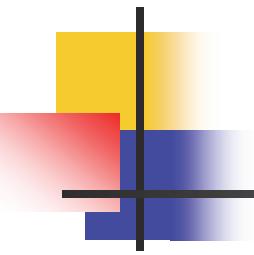
④【影響度】

プラント



(⑤【既存評価での検討】)

基準1,2



3. 定性的評価方法の適用検討 (外的ハザード事象の同定・分類)

外的ハザード事象の同定・分類の試評価(1/3)

外的ハザードの種類		外的ハザード	【基準1】当該の事象は既存評価(設置許可等)結果を利用して、プラントの安全性が損なわれる可能性がないことが確認できるか	【基準2】既存評価(設置許可等)結果を利用して、プラントの安全性が損なわれる可能性がないことが確認できるか	【基準3】発生頻度が極めて小さいことが明確か	【基準4】当該のハザードの影響が及ぶ範囲内に、プラントが存在しないことが確認できるか	【基準5】ハザードが進展していくタイムスケールが、プラントの寿命に比べて十分長いか	【基準6】ハザードが到達したと想定しても、炉心損傷につながる起因事象を引き起こさないことが明らかか	外的ハザード事象の分類結果 (定量的リスク評価の実施要否)
地震・津波災害	地震動	○(地震PRA)	△	×	×	×	×	×	B (ただし、基準4の不確実さが大きいため、定量的リスク評価が必要) → 地震PRA
	地盤沈下	×	×	×	×	×	×	×	C
	地盤隆起	×	×	×	×	×	×	×	C
	地割れ	×	×	×	×	×	×	×	C
	泥湧出	×	×	×	×	×	×	×	C
	液状化現象	×	×	×	×	×	×	×	C
	地滑り	×	△	×	×	×	×	×	B
	土石流	×	×	×	×	×	×	×	C
	山崩れ	×	×	×	×	×	×	×	C
	崖崩れ	×	×	×	×	×	×	×	C
	洪水	×	△	×	×	×	×	×	B
自然災害	津波	○(津波PRA)	△	×	×	×	×	×	B (ただし、基準4の不確実さが大きいため、定量的リスク評価が必要) → 津波PRA
	火災	×	×	×	×	×	×	×	C
	火山弾(大きな噴石)	×	×	×	△(活火山からの距離次第)	×	×	×	B
	火山礫(小さな噴石)	×	×	×	△(活火山からの距離次第)	×	×	×	B
	火碎流	×	×	×	△(活火山からの距離次第)	×	×	×	B
	溶岩流	×	×	×	△(活火山からの距離次第)	×	×	×	B
	土石流	×	×	×	△(活火山からの距離次第)	×	×	×	B
	火碎サージ	×	×	×	△(活火山からの距離次第)	×	×	×	B
	爆風	×	×	×	△(活火山からの距離次第)	×	×	×	B
	降灰	×	×	×	×(広範囲に影響が及ぶ可能性がある)	×	×	×	C
	洪水	×	△	×	△(活火山からの距離次第)	×	×	×	B
	津波	×	△	×	△(活火山からの距離次第)	×	×	×	B
	火災(山林火災)	×	×	×	△(活火山からの距離次第)	×	×	×	B
	火山ガス滞留	×	×	×	△(活火山からの距離次第)	×	○	○	A
	火山ガスによる冷害	×	×	×	△(活火山からの距離次第)	×	×	×	B
	熱湯	×	×	×	△(活火山からの距離次第)	×	×	×	B
	地震	×	△	×	△(活火山からの距離次第)	×	×	×	B
	山体崩壊(崩落)	×	×	×	△(活火山からの距離次第)	×	×	×	B

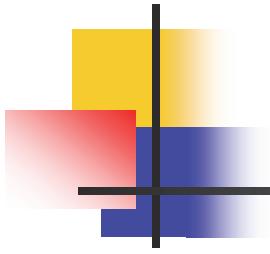
外的ハザード事象の同定・分類の試評価(2/3)

外的ハザードの種類		外的ハザード	【基準1】当該の事象は既存のPRAにおいて評価される事象か	【基準2】既存評価(設置許可等)結果を利用して、プラントの安全性が損なわれる可能性がないことが確認できるか	【基準3】発生頻度が極めて小さいことが明確か	【基準4】当該のハザードの影響が及ぶ範囲内に、プラントが存在しないことが確認できるか	【基準5】ハザードが進展したと想定しても、炉心損傷につながる起因事象を引き起こさないことが明らかか	【基準6】ハザードが到達したと想定しても、炉心損傷につながる起因事象を引き起こさないことが明らかか	外的ハザード事象の分類結果 (定量的リスク評価の実施要否)
自然災害	気象災害	暴風(風)	×	△	×	×	×	×	B (ただし、基準4の不確実さが大きいため、定量的リスク評価が必要) → 地震PRA
		暴風による火災	×	△	×	×	×	×	B
		暴風による雪崩	×	×	×	×	×	×	C
		暴風による砂嵐	×	×	×	○	×	×	A
		風浪・高波 (○)(影響は津波に含まれる)	×	×	×	×	×	×	C (ただし、津波PRAに包含)
		海水位の異常な上昇 (○)(影響は津波に含まれる)	×	×	×	×	×	△	C (ただし、津波PRAに包含)
		豪雨(浸水) (○)(影響は津波に含まれる)	×	×	×	×	×	×	C (ただし、津波PRAに包含)
		豪雨による洪水	×	△	×	×	×	×	B
		豪雨による土石流	×	×	×	×	×	×	C
		豪雨による鉄砲水	×	×	×	×	×	×	C
		豪雨による山崩れ	×	×	×	×	×	×	C
		豪雨による地滑り	×	△	×	×	×	×	B (ただし、基準4の不確実さが大きいため、定量的リスク評価が必要) → 津波PRA
		豪雨による崖崩れ	×	×	×	×	×	×	C
		高潮 (○)(影響は津波に含まれる)	△	×	×	×	×	×	B
		静振	×	×	○(プラント周辺に湖・ダムが無い場合)		×	×	A
		風津波 (○)(影響は津波に含まれる)	×	×	×	×	×	×	C (ただし、津波PRAに包含)
		霧	×	×	×	×	○		A
		豪雪による荷重	×	△	×	×	×	×	B
		豪雪による雪崩	×	×	×	×	×	×	C
		吹雪	×	×	×	×	○		A
		豪雪による洪水 (○)(影響は津波に含まれる)	△	×	×	×	×	×	B
		融雪による山崩れ	×	×	×	×	×	×	C
		融雪による地滑り	×	△	×	×	×	×	B
		落雷(電流) ○(外部電源喪失起因事象で考慮)	△	×	×	×	×	×	B
		落雷による火災	×	△	×	×	×	×	B
		降雹	×	×	×	×	○		A
		霜	×	×	×	×	○		A
		竜巻	×	×	×	×	×	×	C
		海水による川の閉塞 (○)(影響は津波に含まれる)	×	×	○(プラント周辺に河川が無い場合)		×	×	A
		湖若しくは川の水位下降 (○)(影響は津波に含まれる)	×	×	○(プラント周辺に河川が無い場合)		×	×	A
		旱魃	×	×	×	○	○		A
		夏の高温	×	×	×	×	○		A
		氷結(低温)	×	△	×	×	○		A
		海流異変(原因は黒潮)	×	×	×	×	○		A

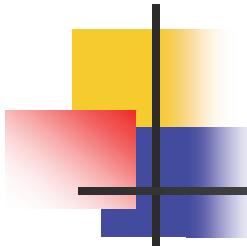
【1】出典:倉本孝弘, 日本国力学会2012年秋の大会 標準委員会セッション, 4 「リスク評価とPRA基準の開発計画」発表資料

外的ハザード事象の同定・分類の試評価(3/3)

外的ハザードの種類		外的ハザード	【基準1】当該の事象は既存のPRAにおいて評価される事象か	【基準2】既存評価(設置許可等)結果を利用して、プラントの安全性が損なわれることがないことが確認できるか	【基準3】発生頻度が極めて小さいことが明確か	【基準4】当該のハザードの影響が及ぶ範囲内に、プラントが存在しないことが確認できるか	【基準5】ハザードが進展していくタイムスケールが、プラントの寿命に比べて十分長いか	【基準6】ハザードが到達したと想定しても、炉心損傷につながる起因事象を引き起こさないことが明らかか	外的ハザード事象の分類結果 (定量的リスク評価の実施要否)
自然災害	その他の災害	森林火災	×	×	×	×	×	×	A: 定量的リスク評価不要: 基準2~6のいずれかが○ B: 不確定さ確認の上で判断を行う: 基準2~6に○はないがいずれかが△ C: 定量的リスク評価要: いずれも×
		海岸浸食 (○)(影響は津波に含まれる)	×	×	×	○	×	B (ただし、基準4の不確実さが大きいため、定量的リスク評価が必要) → 地震PRA	
		生物学的事象	×	×	×	○	×	A	
		隕石	×	×	△	×	×	B	
		満潮 (○)(影響は津波に含まれる)	×	×	×	×	○	A	
		毒性ガス	×	×	×	×	○	A	
人為災害	人為災害	河川の流路変更	×	×	×	○(プラント周辺に河川が無い場合)	○	×	A
		航空機落下	×	△	×	×	×	×	B
		人工衛星	×	△	×	×	×	×	B
		輸送事故	×	×	×	×	×	×	C
		船舶の衝突	×	×	×	×	×	×	C
		タービンミサイル	×	○	×	×	×	×	B (ただし、基準4の不確実さが大きいため、定量的リスク評価が必要) → 津波PRA
		産業又は軍事施設事故	×	×	×	○(10km圏内に当該施設が無い場合)	×	×	A
		パイプライン事故	×	×	×	○(10km圏内に当該施設が無い場合)	×	×	A
		ボーリング工事の影響によるガス異常噴出	×	×	×	○(10km圏内に当該施設が無い場合)	×	×	A
		油流出	×	×	×	×	×	×	C
		サイト内の貯蔵庫からの化学物質放出	×	×	×	×	×	×	C
		治水構造物の破損による洪水及び波 (○)(影響は津波に含まれる)	×	○	○(周辺に治水構造物が無い場合)	×	×	○	A

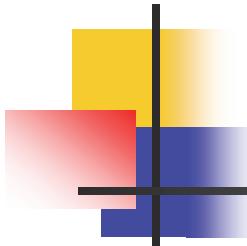


外的事象PRAの実施手法



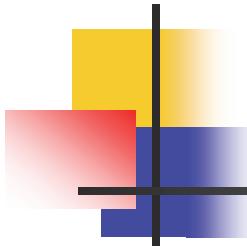
外的事象PRA実施手法の概要

- PRAの課題
- 外的事象PRAの種類
- 地震PRAの概要
- 津波PRAの概要
- 外的事象PRAの特徴を踏まえた構想
- PRA実施基準の策定状況と計画概要



外的PRAの課題(その1)

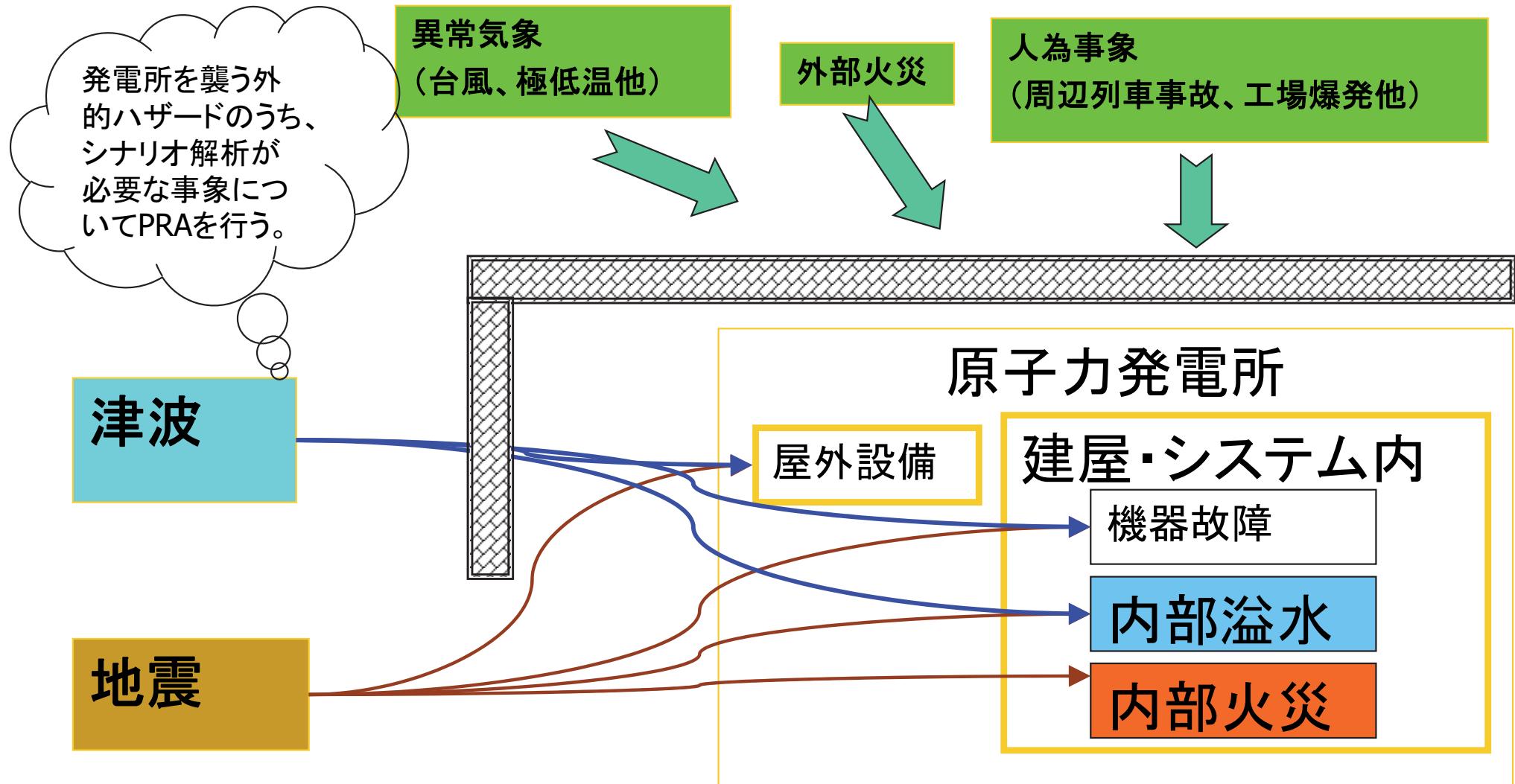
- 福島第一原子力発電所事故を鑑みると、津波のような自然災害のハザード解析、**外的事象PRA**による**リスクプロフィールの把握**、**外的事象PRA**結果からの**アクシデントマネジメント整備**、といったPRAの寄与が可能な局面が含まれている。
- 「東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会(畠村委員長、H24.7.23)」の最終報告書には、“外的事象を対象としたアクシデントマネジメント導入に至らなかつた経緯”において『**地震PSA**による評価や津波に対する安全評価を始めとして、事故の起因となる可能性がある**火災、火山、斜面崩落等の外部事象**を含めた**総合的なリスク評価**は行われていなかつた。』と記載されている。
- 更に続けて、『施設の置かれた自然環境は様々であり、**発生頻度は高くない場合**ではあっても、**地震・地震随伴事象以外の溢水・火山・火災等の外的事象**及び**従前から評価の対象としてきた内的事象**をも考慮に入れて、施設の置かれた自然環境特性に応じて**総合的なリスク評価**を事業者が行い、規制当局等が確認を行うことが必要である。その際には、**必ずしもPSAの標準化が完了していない外的事象**についても、事業者は現段階で可能な手法を積極的に用いるとともに、国においてもその研究が促進されるよう支援することが必要である。』と提言している。



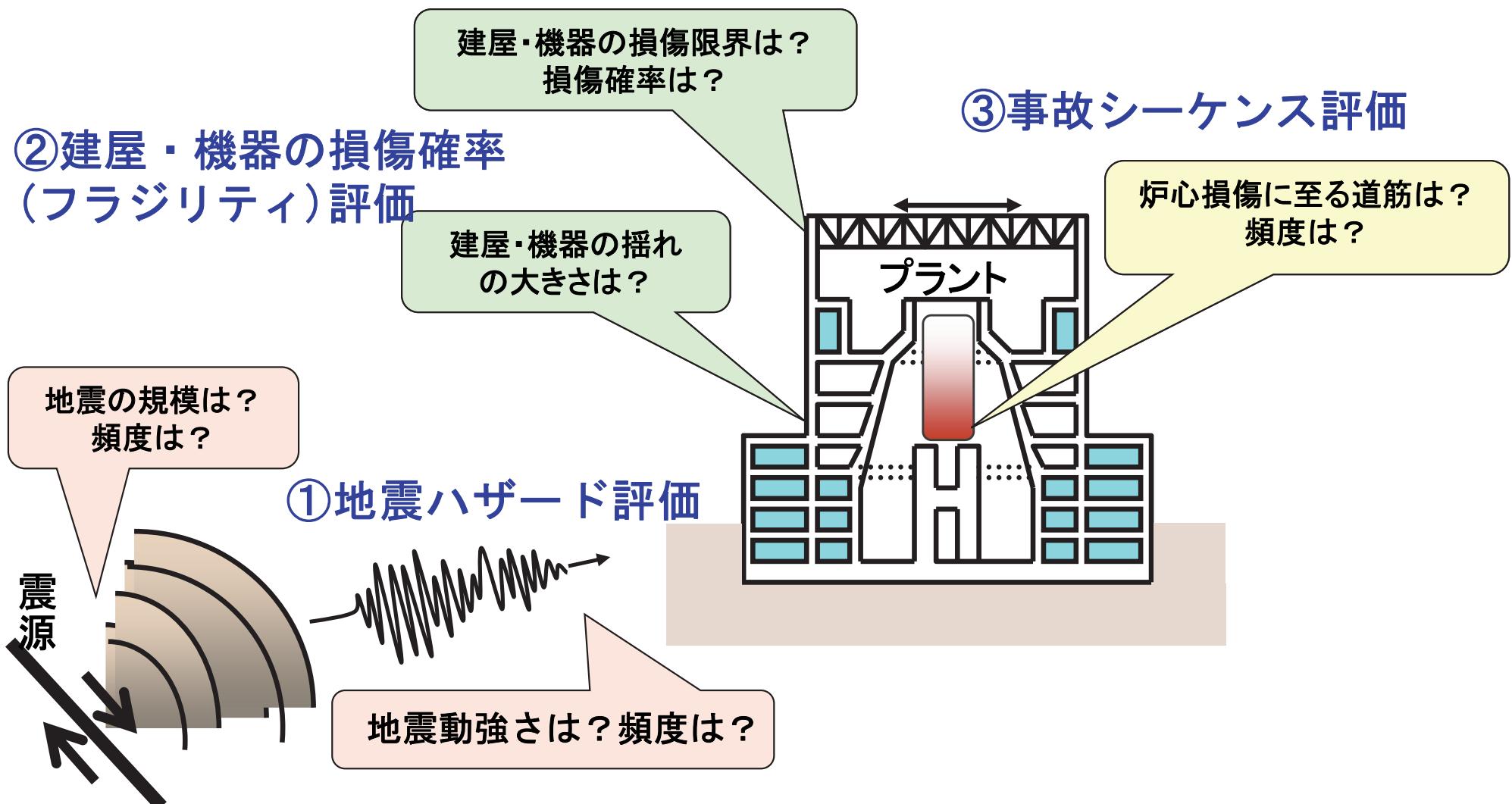
外的PRAの課題(その2)

- 内的事象のみならず、広く外的ハザードを考慮して原子力発電所の安全性を向上するために、外的事象PRA標準の整備に取り組む。
- 地震、津波、内部溢水PRA以外の実施基準の整備が必要。単独の外的事象としては、**火災**。
- 次に**地震随伴事象のPRA実施基準**に着手する。津波は既に地震との重畠状態のPRAを議論中。
- 地震、津波、火災、内部溢水以外の**異常気象などの外的ハザード事象**についてもそれらの特性に適切なリスク評価方法を選択する方法論を検討中。
- **停止時**状態に外的事象が発生したPRA、あるいは**外的事象によるL2PRA**についても、複数PRA実施基準の参照で評価可能か、あるいはそれぞれのPRA実施基準が必要かを検討。
- 外的事象PRA実施基準だけではないが、**PRA品質の確保**にかかる要件をまとめて実施基準とする。

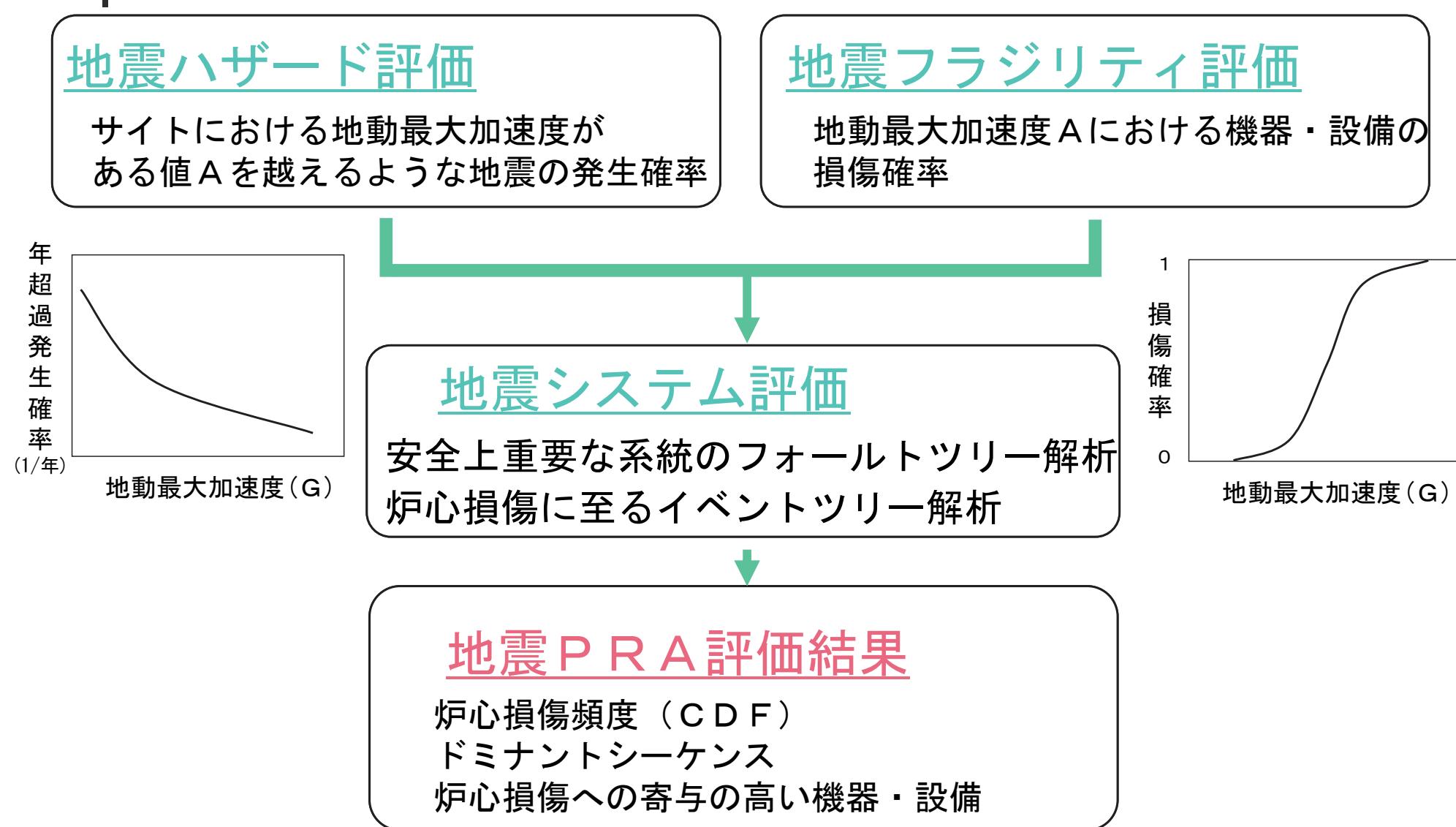
外的事象PRAの種類



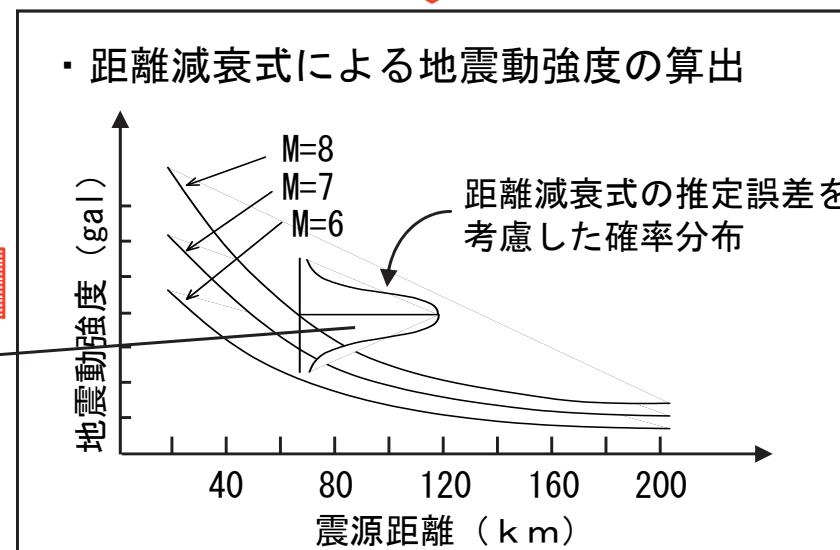
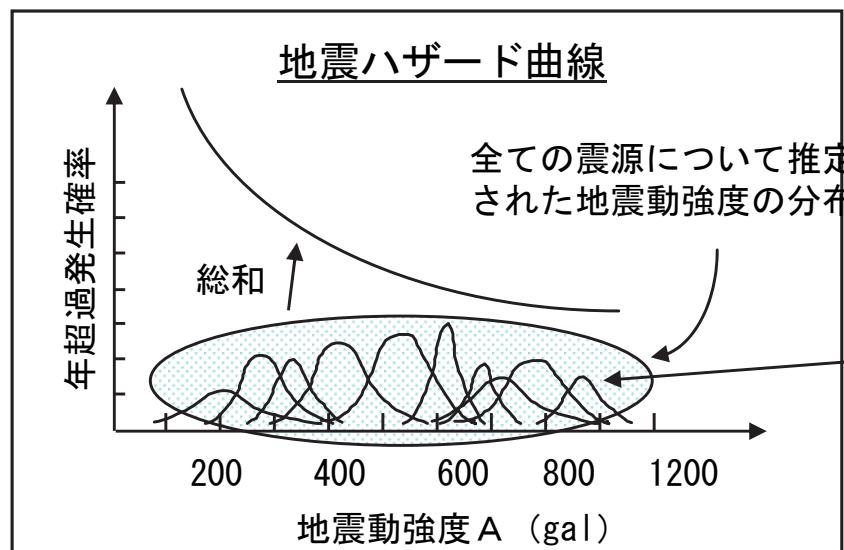
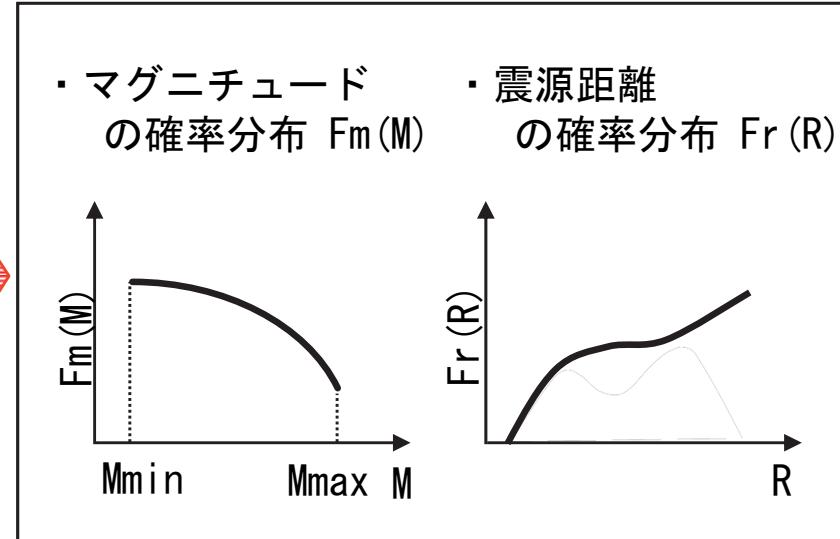
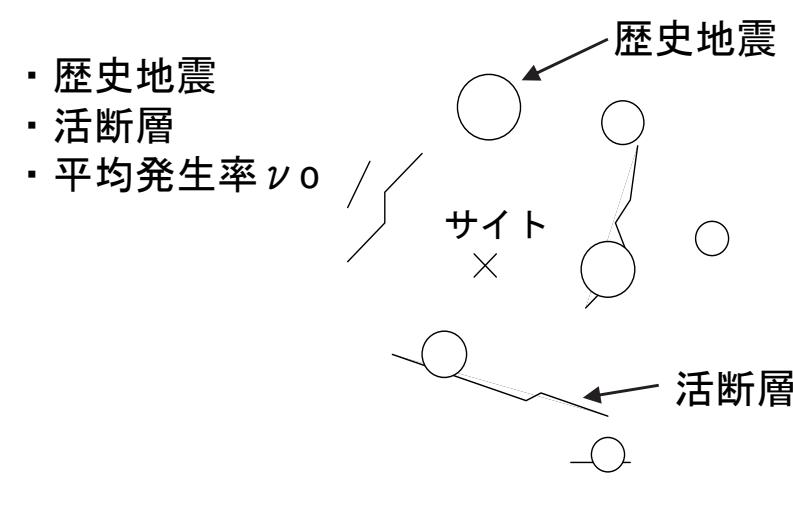
地震PRA手法の特徴



地震PRA手法の概要(手順)



地震PRA手法の概要(ハザード解析)

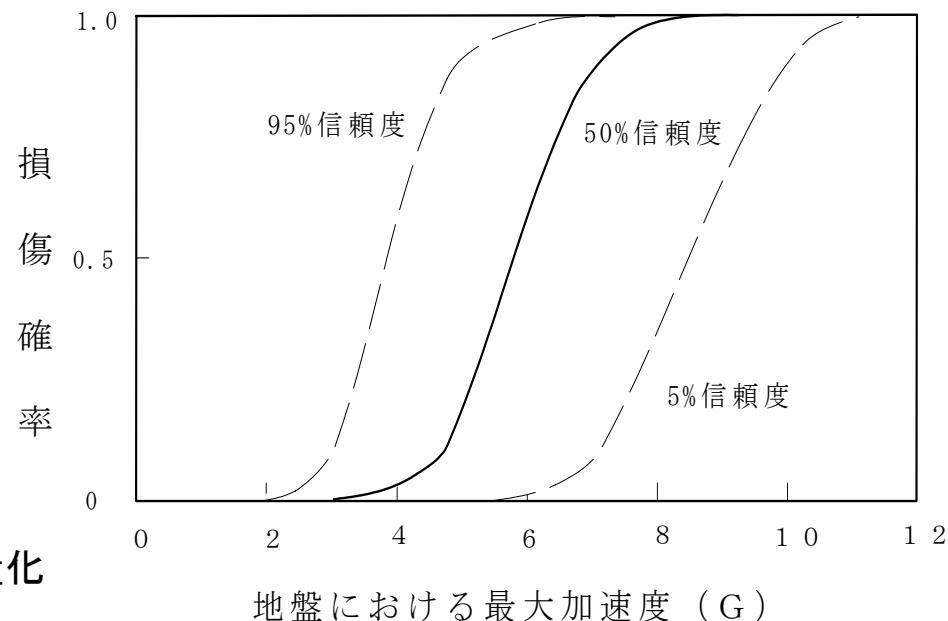


地震PRA手法の概要(フラジリティ評価)

設備の耐震設計に内在する様々な裕度(例えば、統計値の95%信頼度を用いているなど)をそれぞれ安全係数(中央値及び不確定性)として定量化し、それをもとに設備の損傷確率曲線(フラジリティカーブ)を算定。

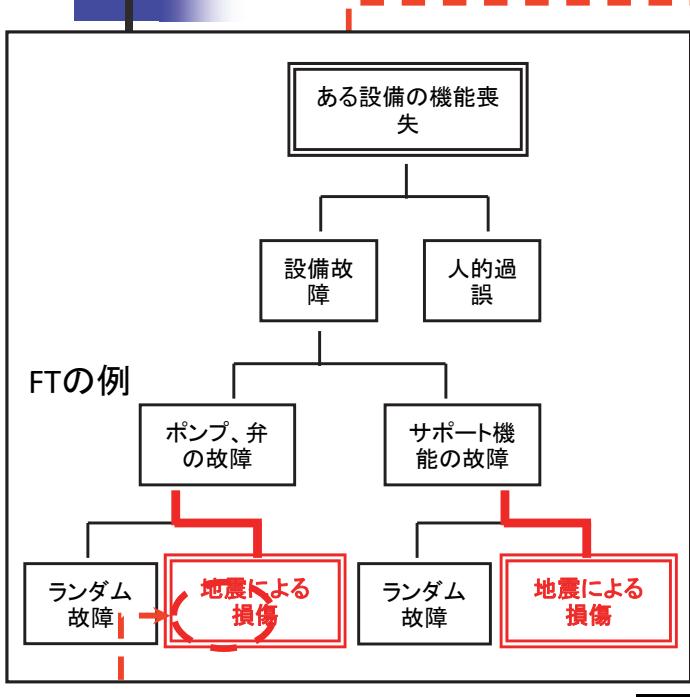
- ・ 設計建屋応答に内在する裕度
- ・ 設計機器応答に内在する裕度
- ・ 設計機器耐力に内在する裕度

※ これらの裕度をさらに詳細な要素に分けて定量化



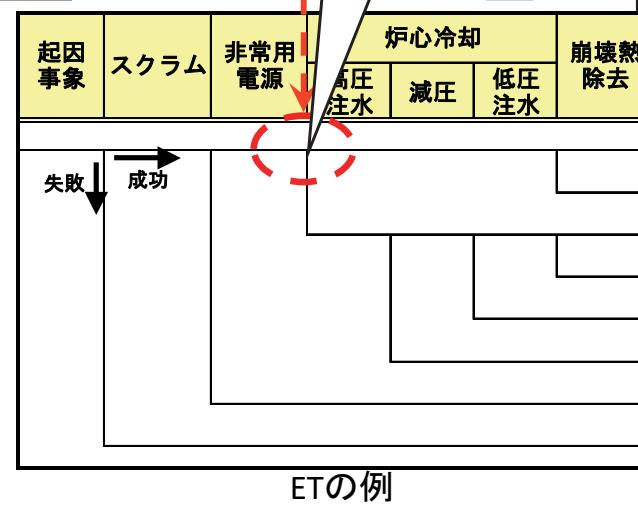
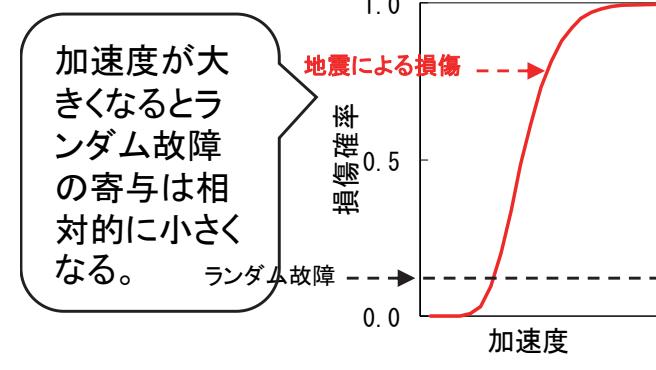
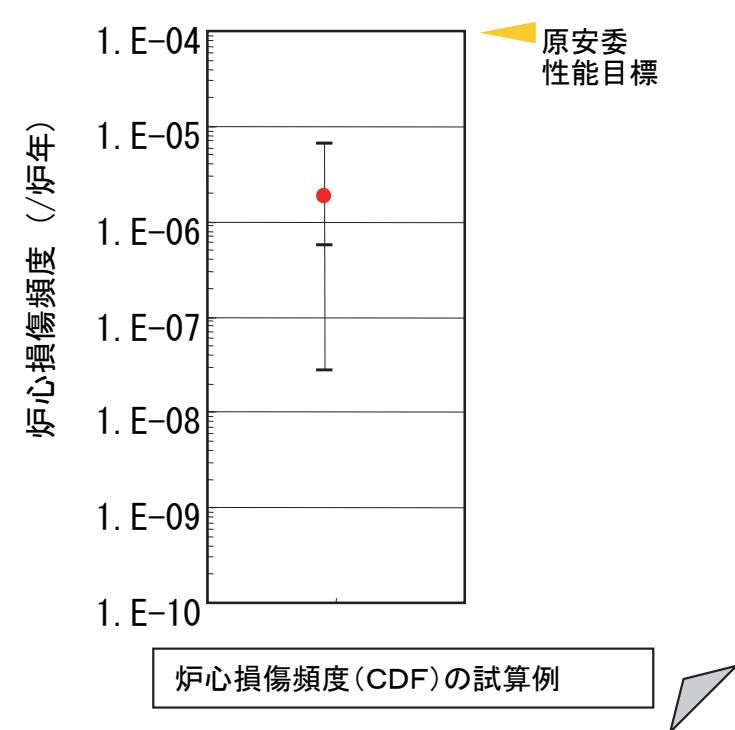
設備の損傷確率曲線(フラジリティカーブ) の例

地震PRA手法の概要(システム評価)



イベントツリー(ET)、
フォールトツリー(FT)を用
いて炉心損傷に至る事象
の発生頻度を、炉心損傷
頻度(CDF)として算出

それぞれの分岐(=成功
または失敗)の確率をFT
に基づいて算出し割り当てる



加速度が大
きくなるとラ
ンダム故障
の寄与は相
対的に小さく
なる。

ランダム故障

- ✓ 炉心損傷頻度は平均値で 10^{-6} /炉年 のオーダー
- ✓ 不確実さの幅 (90%信頼区間の幅) は、2桁から3桁程度。
- ✓ 地震PRAはサイトの地震ハザード条件の影響が大きい。

津波PRA手法の概要(手順)

プラント構成・特性及びサイト状況の調査

- ・サイト・プラント情報の収集・分析
- ・サイト・プラントウォークダウンの実施

事故シナリオの同定

- ・事故シナリオの広範な分析・選定
- ・広範な事故シナリオのスクリーニング
- ・事故シナリオの明確化
- ・起因事象の分析
- ・建屋・機器リストの作成

STEP1: 津波ハザード評価

- 津波ハザード評価における不確実さ要因の取扱い
- 津波発生域モデルの設定
- 津波発生・伝播の数値モデルの設定
- ロジックツリーの作成
- 津波ハザードの評価
- 津波遡上の評価

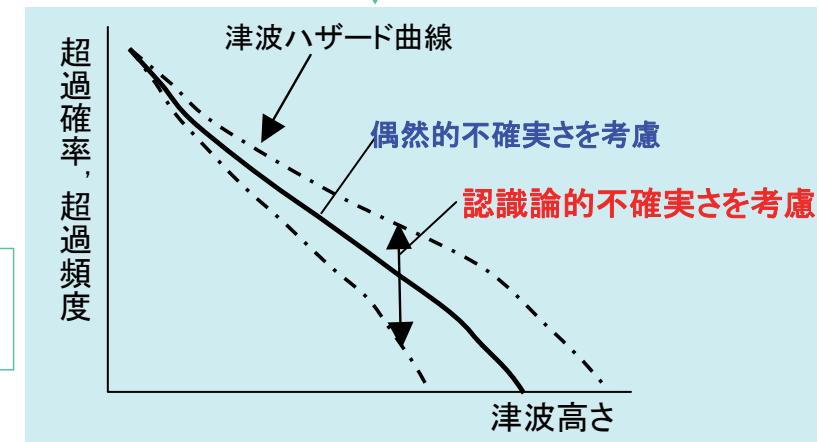
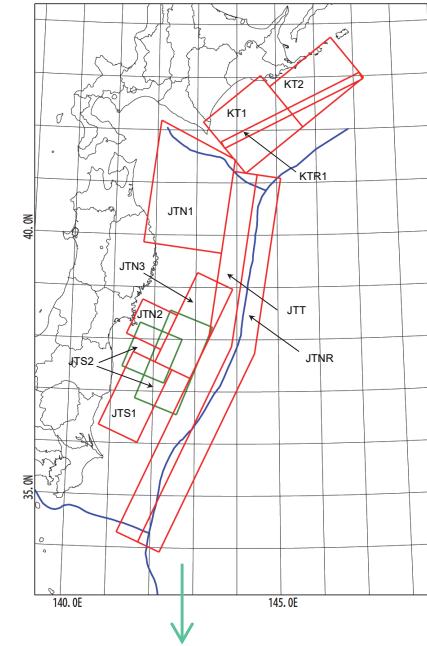
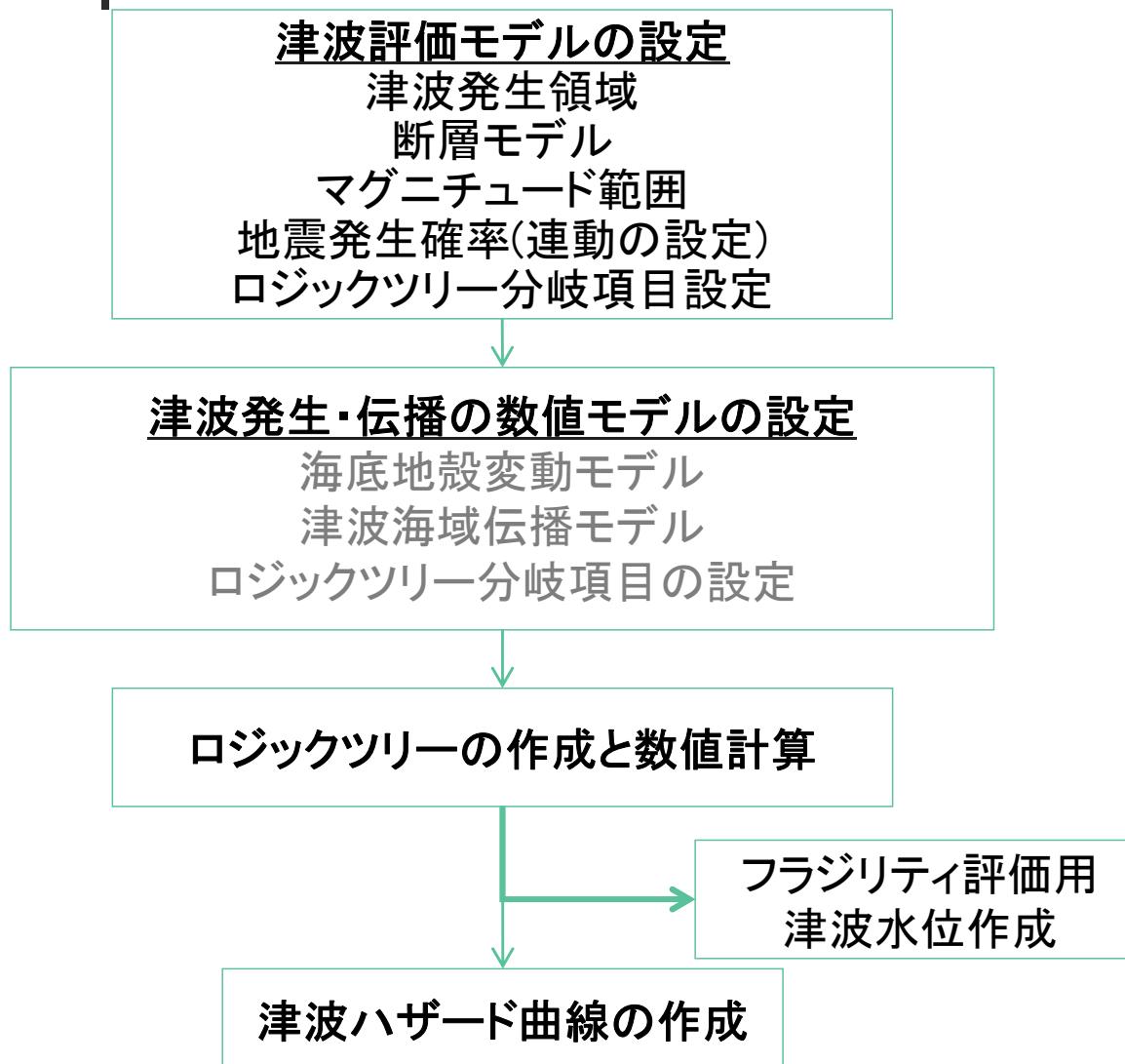
STEP2: 建屋・機器フラジリティ評価

- 評価対象と損傷モードの設定
- 評価手法の選択
- 耐力の評価
- 応答の評価
- フラジリティの評価

STEP3: 事故シーケンス評価

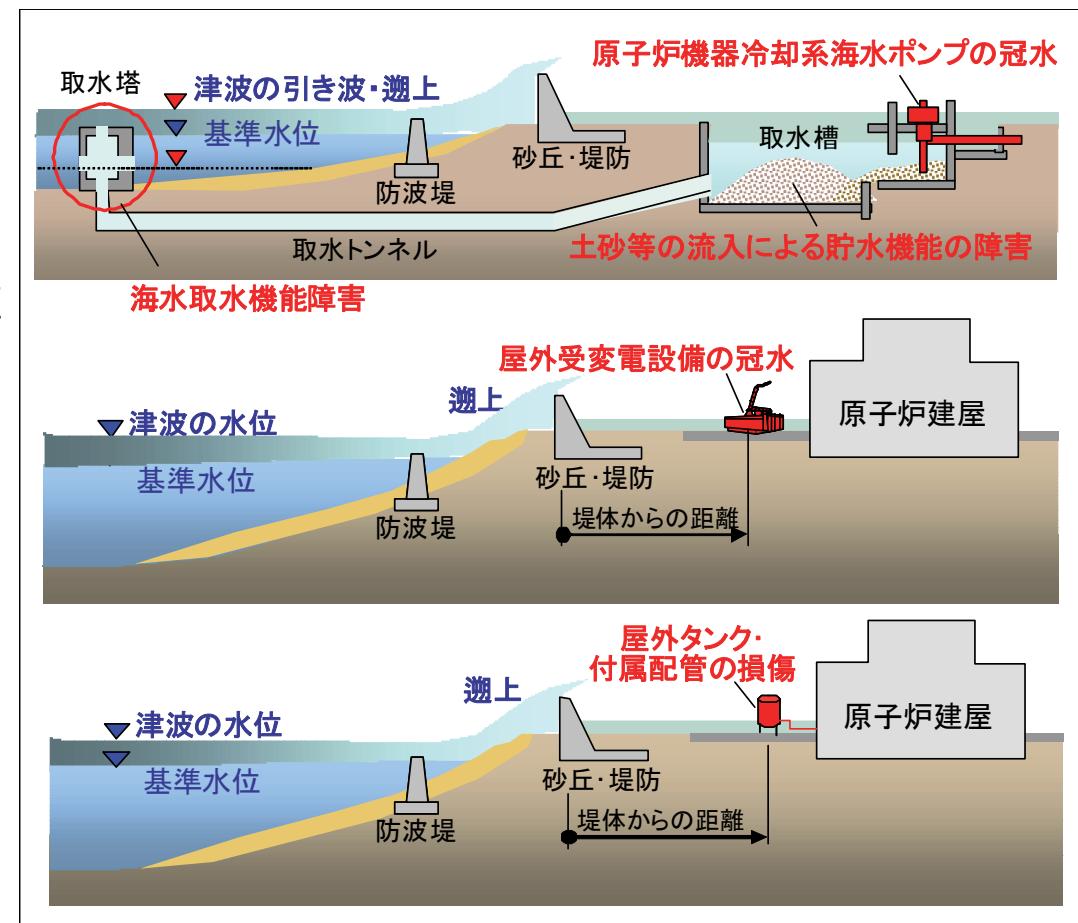
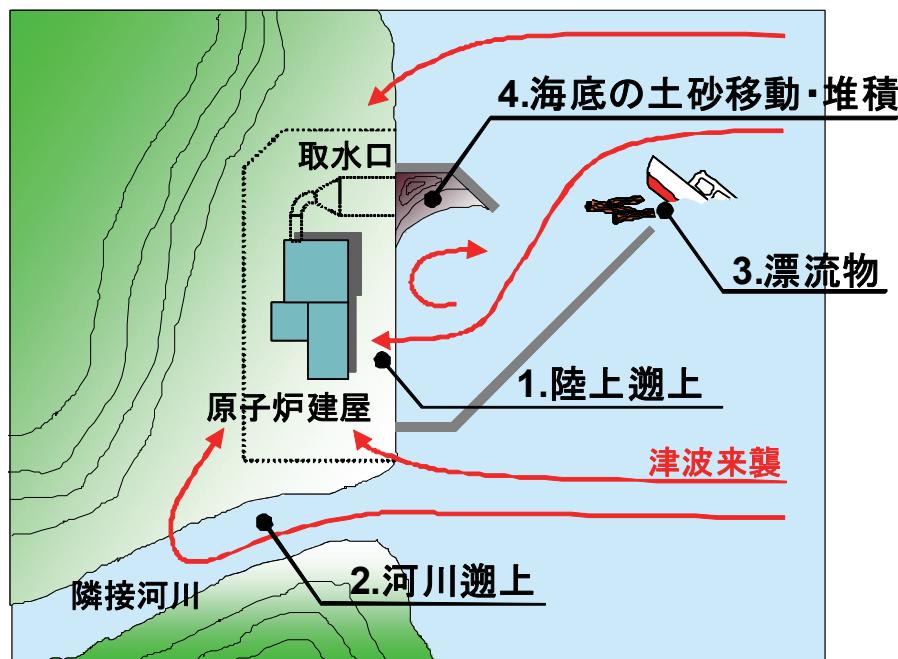
- 起因事象の設定
- 事故シーケンスのモデル化
- システムのモデル化
- 事故シーケンスの定量化

津波PRA手法の概要(津波ハザード評価)

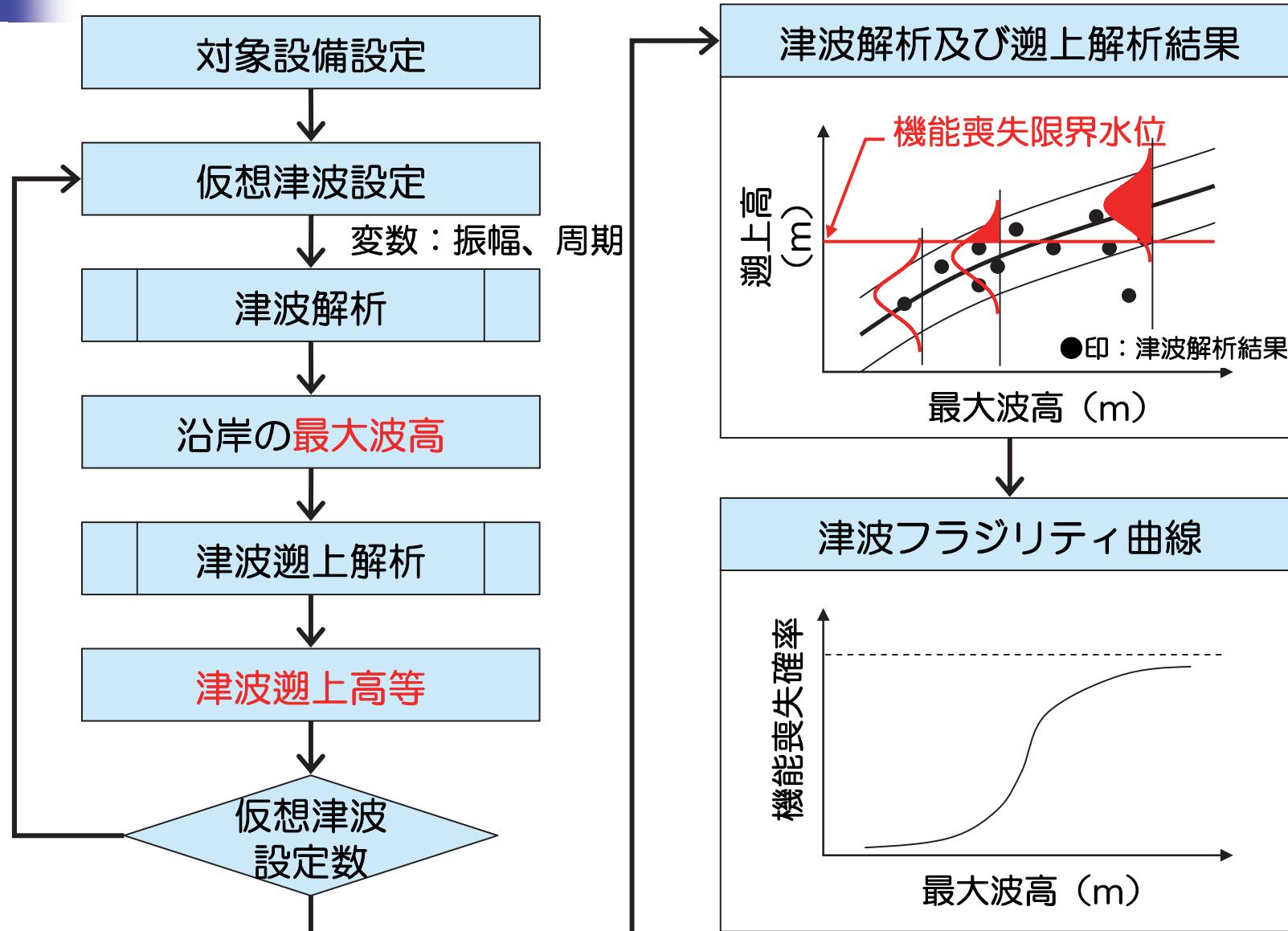


津波PRA手法の概要(事故シナリオ)

津波による発電所への「脅威」は、①波力、②洗掘、③漂流物衝突、④海底砂移動、⑤没水、⑥被水 が考えられる。津波PSAは、津波が発電所を襲った際に、海水がどこまで到達するか、建屋・機器がどのような影響で破損・機能喪失するかという確率を使って、炉心損傷に至る事故シナリオを描く。



津波PRA手法の概要(フラジリティ評価)



津波PRA手法の概要(システム評価)

起因事象の設定

- 津波によって誘発される起因事象：
 - ① 津波による原子炉停止
 - ② 津波による施設の損傷
- 起因事象となり得る津波による施設の損傷：
 - ・建屋などの建物・構築物の大型静的機器の損傷
 - ・非常用海水系などのサポート系の機能喪失

事故シーケンスのモデル化

- 基本的には、内的事象PRAのモデルを利用できる。
- 津波以外の機能喪失要因であるランダム故障などとして、次を考慮する。
 - ・機器故障、試験、又は保守による待機除外
 - ・人的過誤
 - ・従属故障である共通原因故障
- 特に、人的過誤のモデル化については、津波時特有の高ストレス状態を考慮して適切に設定する。

システムのモデル化

- 炉心損傷に至る事故シーケンス i の発生頻度(CDF i)の算出：

$$CDF_i = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} h(a) \cdot Q_i(a) da$$

事故シーケンスの定量化

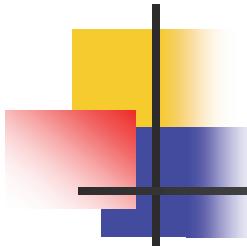
外的事象PRAの特徴を踏まえた検討

- ハザード解析の結果における**不確実さが大きい**。
- プラントへの影響(フラジリティ解析)においても**データが少ない**などの理由で機能喪失の評価上の判断が難しい。
- 複合事象の組み合わせを考えると**事故シナリオが際限が無く多岐**にわたるので、出来るだけ広くかつ具体性のある事故シナリオを挙げることが必要。その**科学的想像力**が求められる。

外的事象PRAは複数の技術分野に渡るので、

PRAはその結果(CDFのような数値結果だけではなく、支配的な機器や操作などの情報も)から**意思決定(@規制活動or事業者安全確保活動)**を行えることが最大の佳処。

- 外的事象PRA実施基準の整備展開にあたり、単純な事象拡張では策定効率が悪い。**時宜を得て必要なPRA実施基準を提示**していくべき。
- 事故調査報告のようにPRAにかかる期待と要求は以前に比べると高まっているが、その分、**関係者が正確な理解**をすべき。



出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【1】	‡	倉本孝弘, 日本原子力学会2012年秋の大会 標準委員会セッション, 4 「リスク評価とPRA基準の開発計画」発表資料, 外的ハザード事象のリスク評価とPRA基準の開発計画 その1: 外的ハザード事象評価の分類手法の検討, http://www.aesj.or.jp/sc/comittees/gijiroku/etc/2012a_sc_session4_1.pdf
【2】	‡	成宮祥介, 日本原子力学会2012年秋の大会 標準委員会セッション, 4 「リスク評価とPRA基準の開発計画」発表資料, 外的ハザード事象のリスク評価とPRA基準の開発計画 －外的事象PRA実施基準の整備－, http://www.aesj.or.jp/sc/comittees/gijiroku/etc/2012a_sc_session4_2.pdf