

標準委員会セッション1 「リスク情報を原子カプラントの安全性向上に役立てる」

# (1)原子カプラントの包括的なリスク評価

～外的事象に着目して～

原子力学会標準員会リスク専門部会 幹事

成宮 祥介（関西電力）

2013年9月3日

## 発表内容

- 確率論的リスク評価 (PRA、Probabilistic Risk Assessment) は原子力プラントの安全性を向上できるか？
  - 原子力発電所の安全は、如何なるリスクに対処することで達成されているのか？
  - リスク評価はリスクマネジメントの中で、どういう位置づけか？
  - リスク評価＝確率論的リスク評価 (PRA) か？
  - PRA、特に外的事象PRAは、どのようなものか？
  - 外的事象PRAは使えるのか？
  - 原子力学会はPRA手法に関してどういう貢献が可能か？

# 原子力発電所の安全とリスク(#1)

原子力安全の目的: 人と環境を原子力の施設と活動に起因する放射線の有害な影響から防護すること

原子力発電所が発揮すべき安全機能は、

- | 供用期間中
- | 考えられる状態

において維持されなければならない。

「安全機能」とは？

- | 停止機能(止める)
- | 冷却機能(冷やす)
- | 格納機能(閉じ込める)

- ①×②の組み合わせの状態における『リスク』に対して様々な**意思決定(Decision Making)**をする
- ① 設計で想定している状態(通常運転状態、過渡変化状態か、事故状態か)か、それを超える状態。
  - ② 内の事象(機器故障や操作ミス)か、外的事象(内部火災や地震、津波)かが発生している状態

『リスク』は様々。  
リスクに対して意思決定をする、とは必ずしもシビアアクシデント対策を検討することだけではない。

# 原子力発電所の安全とリスク(#2)

## 一般のリスクの定義

1. 大辞泉: ①危険、危険度。 ②保険で損害を受ける可能性。
2. ISO12100:2003「機械類の安全性—基本概念、設計のための一般原則」  
危害の発生確率と危害のひどさの組合せ
3. Webster's Collegiate Dictionary, 5th edition  
①The chance of loss, ②The degree of probability of loss, ③The amount of possible loss, ④  
The type of loss that insurance policy covers

## リスクの三重項(Triplet)による解析

Kaplan and Garrickによると、リスク解析は次の3つの質問に対する答えを提示するためのものとされている。

**What can go wrong?**

何が起こりうるか？

**What is the likelihood of that happening?**

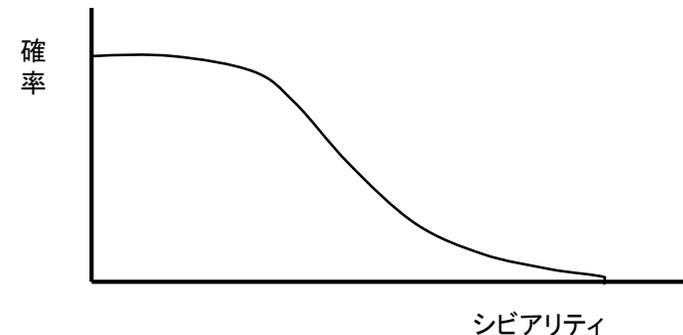
それはどのくらい起こりやすいか？

**What are the consequences?**

それが起こったとして、その結果はどうなるのか？

Kaplan and Garrickは、リスクを確率 $p_i$ と結果 $x_i$ の組からなるシナリオ $s_i$ として定義した。

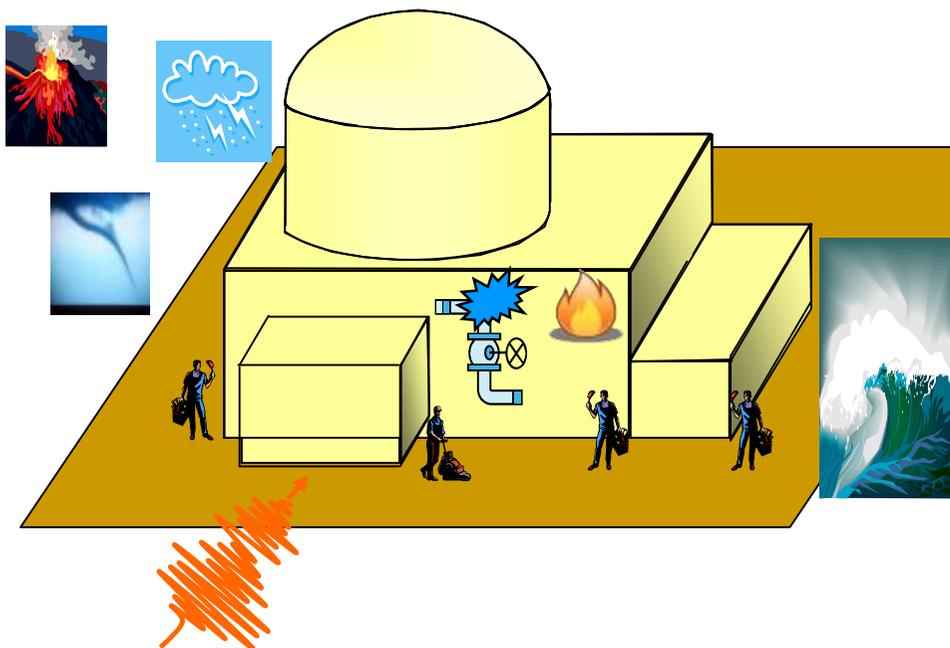
そのシナリオをシビアリティの大きさの順に横軸に並べ、  
縦軸にそのシビアリティの災害が発生する確率として  
リスク曲線を描くと右図のようになる。



# 原子力発電所の安全とリスク(#3)

原子力発電所は例えば次のような事態に晒されるかもしれない

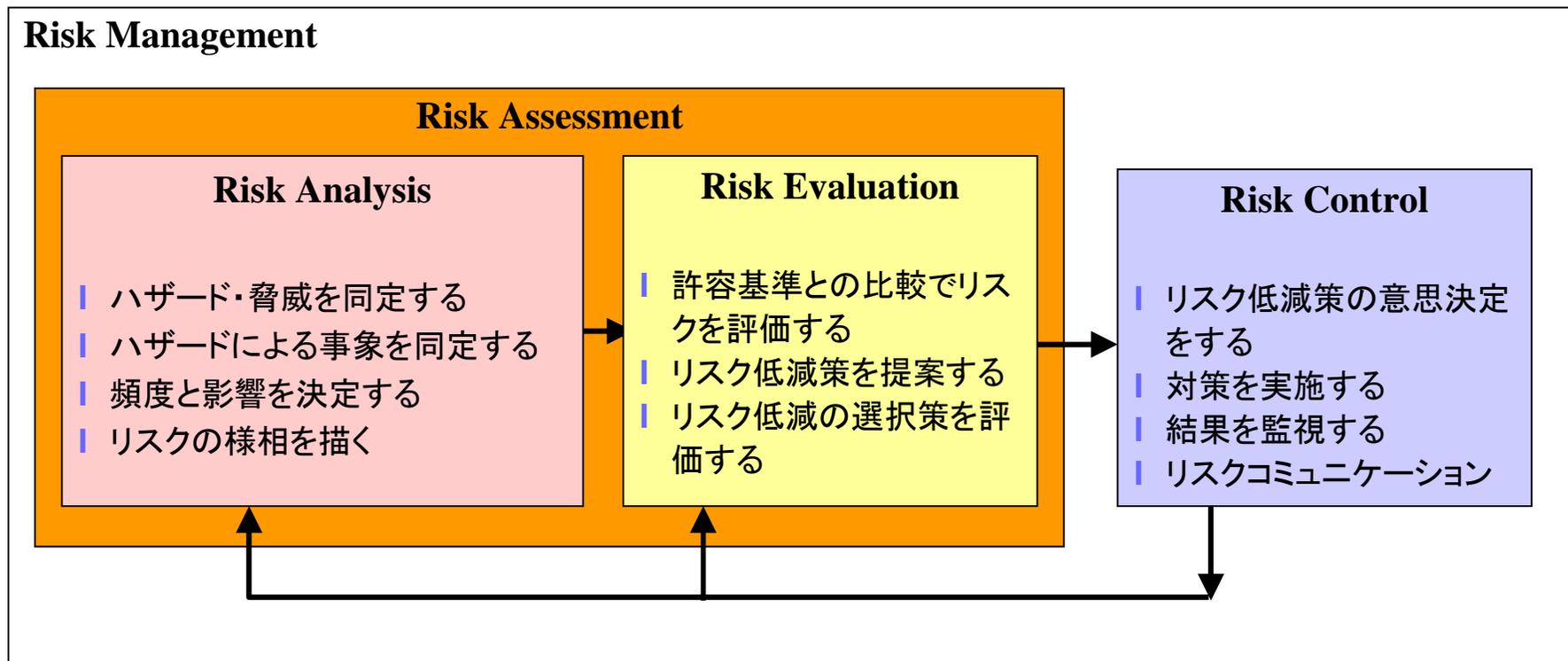
- ・稼働中の海水ポンプの回転軸に微かな異音がする
- ・計器の値を読み間違えて、ポンプの流量を絞ってしまった。
- ・工事中、溶接の火花で、広範囲に火災が発生した。
- ・大きな地震があり、斜面が崩壊し海水取水路を塞いだ。
- ・雷が近くの変電設備に落ち、外部電源が喪失した。
- ・地震のあと、大きな津波が来襲し、非常用電源が喪失した。



- ・これらの事態の発生頻度、影響内容は大小さまざま。
- ・また、これらを契機に進展する事故シーケンスの不確かさもさまざま。
- ・しかし、これらの事態が発生しないように(発生防止)、また発生しても終息するように(拡大防止)、さらに終息せず進展して炉心損傷などの重大な事故になったとしても、影響を緩和する措置(影響緩和)が、出来るように想定したハザードに対して設計ならびに対策されている。
- ・想定を超えることもあり得る。その場合でも人や環境に有害な影響を及ぼしてはいけない。ハードの多様化だけでなく、教育訓練も併せた柔軟な対応が必要。

しかし、それだけの対策を準備していても、原子力プラントが持つ潜在的だが重篤な Consequence のリスクは、ゼロに出来ると考えてはいけない。

# リスクマネジメントの考え方



出典：IEC 60300-3-9 Risk Analysis of Technological Systems

Risk Analysisの方法は、ハザード並びにそれによる影響の厳しさにより、適切なものが選択される。

# リスク評価とPRA

- 事象の特性により、確定論的評価が相応しいもの、ハザード解析が相応しいもの、PRAが相応しいものがある。同じ事象から派生する事故シナリオのうちでも、構造強度評価や相対的配置の分析だけで、リスク評価が可能なものもある。一方、事故シーケンスの予想が出来ないほど複雑な事象はPRAが相応しい。
- 特に地震起因で発生する内部溢水や内部火災、地震と津波の重畳に火災が加わる場合などの複雑多岐な事故シーケンスが考えられる場合には、PRAは有効。
- 今まで、我が国では内的事象のPRAについて、実施、活用が行なわれてきた。
- 内的事象のPRAが展開されてきたことは、無駄ではなかった。プラントのシステム挙動を評価する基本的な情報と方法を提供するので、外的事象PRAにおいても参考になる。
- しかし、外的事象PRAは、その必要性和重要性は指摘されていたにもかかわらず、具体的な実施にまでは至っていなかった。
- では、全ての外的事象に対してPRAを行なうのが良いのだろうか？

# PRAの概要(#1)

- | PRAは、原子力発電所や飛行機、宇宙ロケットなど、大規模で複雑なシステムの安全性や信頼性を、発生し得るあらゆる事故を対象として、その発生頻度と発生時の影響を、確率論を使って定量的に評価し、その両者で判断される「リスク」がどれ程小さいかで安全性の度合いを検討する手法。
- | 対象とする事故は、内部及び外部に大きな影響(望ましくない影響)を及ぼす事故であり、たとえば、化学工場では有毒ガス漏洩事故、原子力発電所では放射能放出事故、ダム(水力発電所)ではダムの決壊・損傷等。
- | PRAの利点
  - 不確実さを伴った結果が得られる。
  - 大規模システム内の設備間の相互影響を評価できる。
  - 多数の事故シナリオを網羅的に評価できる。
- | PRAにかかる問題点
  - 不確実さが大きい結果が出る。
  - 発生が稀な事象を扱うので、実績データに基づけない。
  - 失敗すること、損傷することなどの悪いことを扱うため、嫌われることがある。

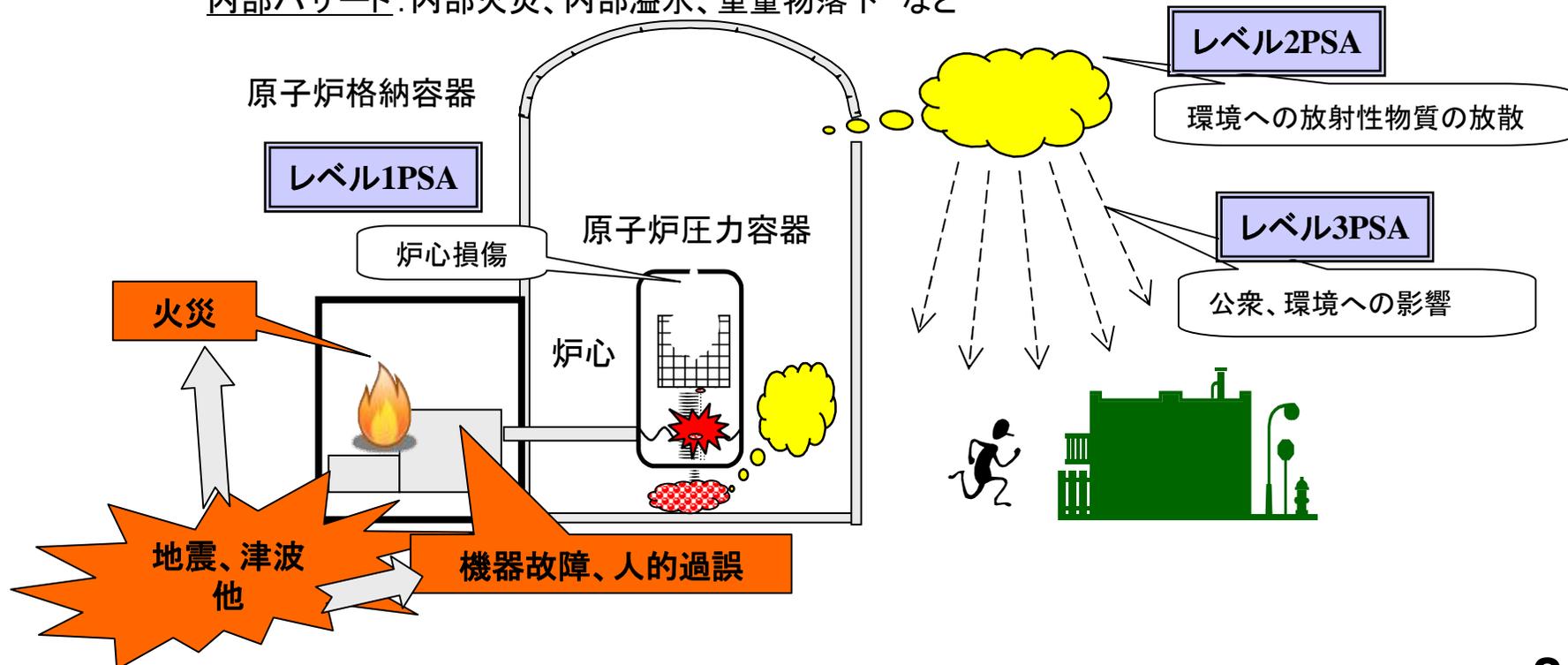
# PRAの概要(#2)

PRAでは、炉心損傷につながる様々な事象を考える。

**内的事象:** システム内で起こる事象(機器故障や人的過誤)が原因となるもの

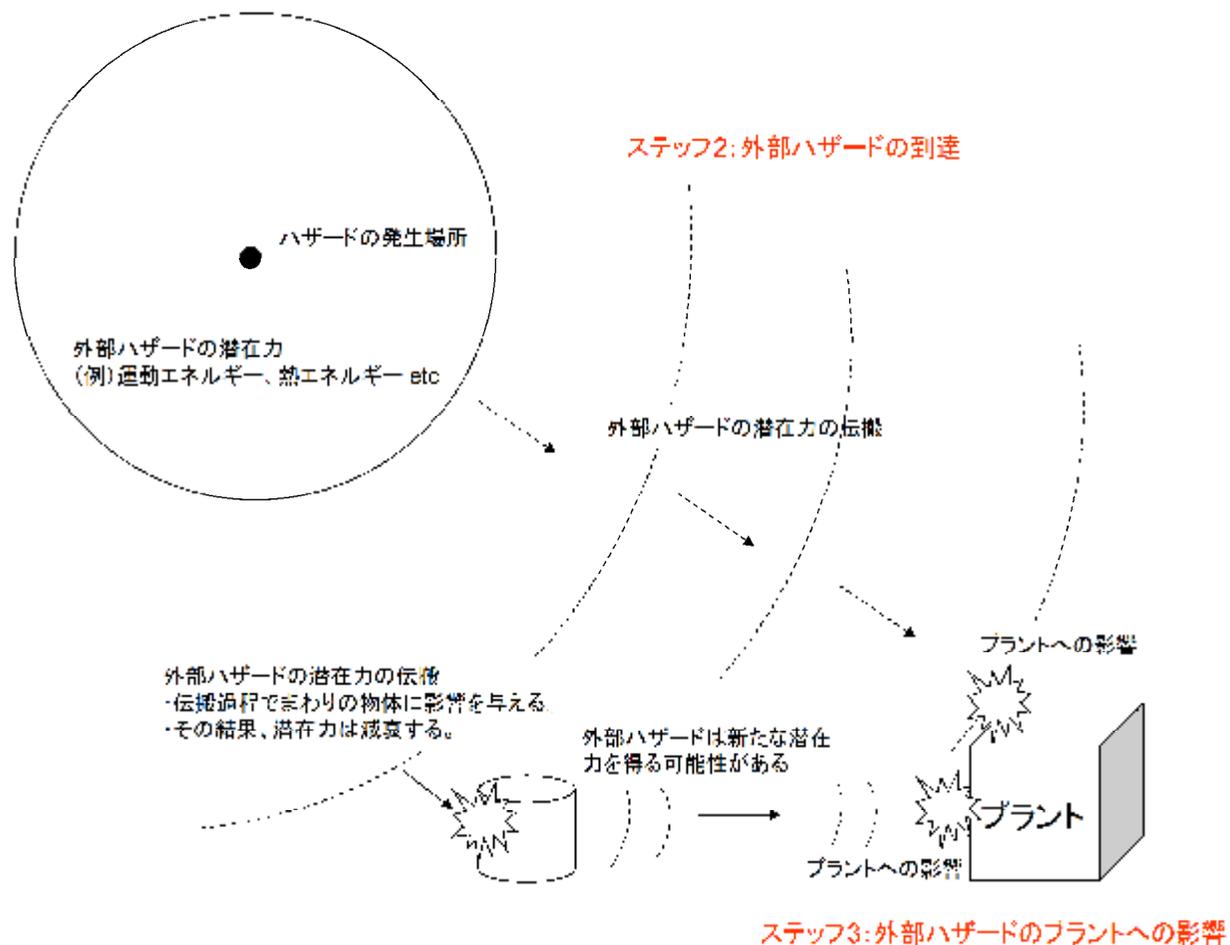
**外的事象:** システムの外で起こる事象が原因となるもの。建屋の中で起こる火災であってもシステムの外なので、外的事象に分類する。

- 外部ハザード:**
  - 自然ハザード:** 地震、津波、火山噴火、台風 など
  - 人為ハザード:** 航空機落下、船舶の衝突 など
- 内部ハザード:** 内部火災、内部溢水、重量物落下 など



# リスク評価手法の選択(#1)

原子力学会では、外部ハザードに対する適切なリスク評価手法の選択について、考え方を検討中。 **ステップ1: 外部ハザードの発生**



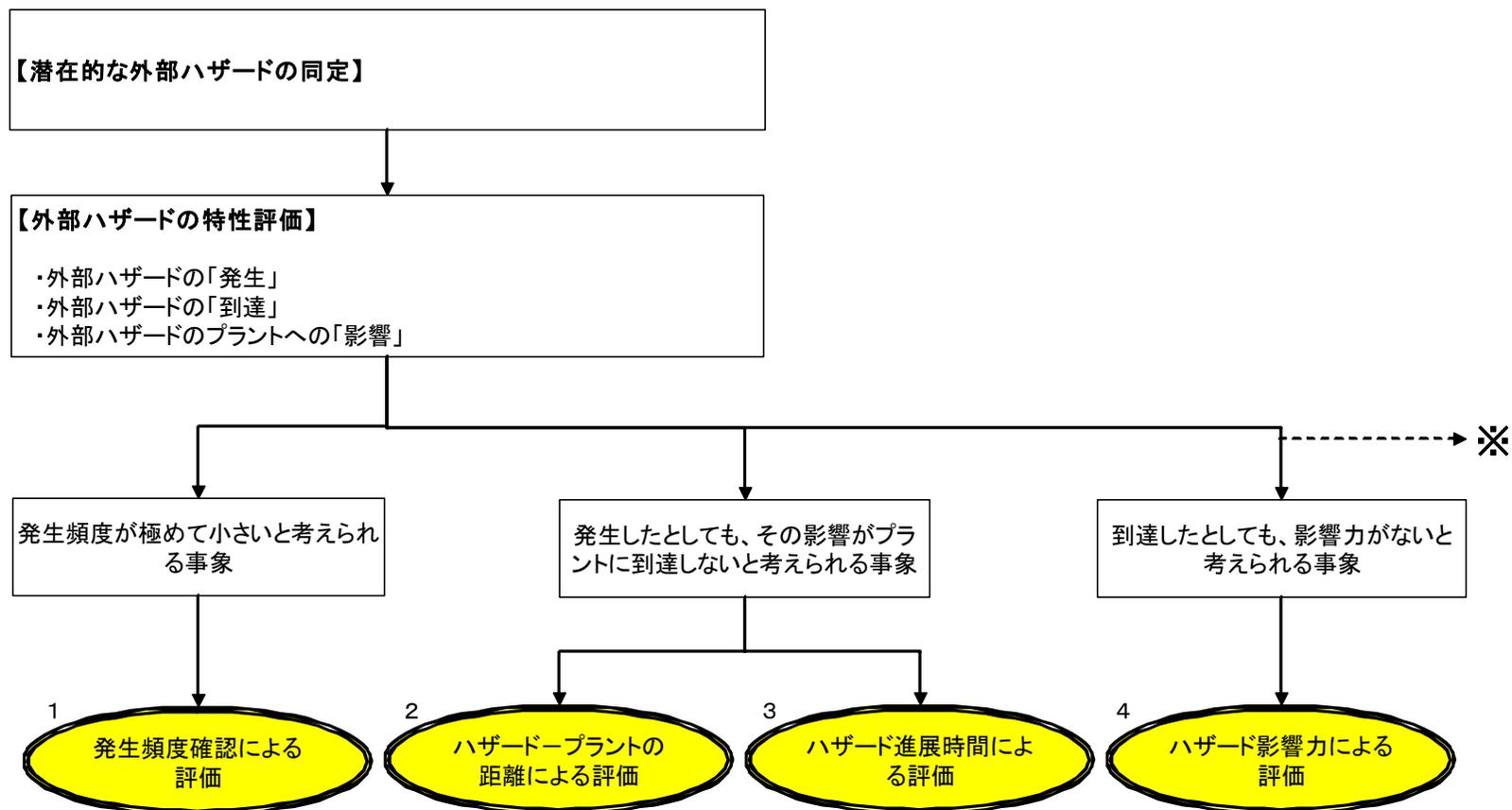
# リスク評価手法の選択(#2)

国内の過去に発生した自然災害、人為災害の図書に、海外の原子力規制基準を追加して、「自然ハザード」、「人為ハザード」の網羅的なリストを作成

ハザードの種類		外部ハザード	
自然ハザード	地震災害	地震動	
		地盤変動	地盤沈下
			地盤隆起
			地割れ
			液状化現象
			地滑り
			土石流
			地震による洪水
	地震による火災		
	津波災害	津波	地震災害による津波
		火山災害による津波	
		隕石による津波	
風水害災害	潮位変化	静振	
		高潮	
人為ハザード	海上災害	船舶の爆発	
		船舶の衝突	
	航空災害	航空機落下	

# リスク評価手法の選択(#3-1)

## <評価方法選定の流れ>



\*: 各評価における判断基準

【基準1】ハザードの発生頻度が極めて小さいことが明確である

【基準2】ハザードがプラントに影響を与えるほど近傍で発生しない

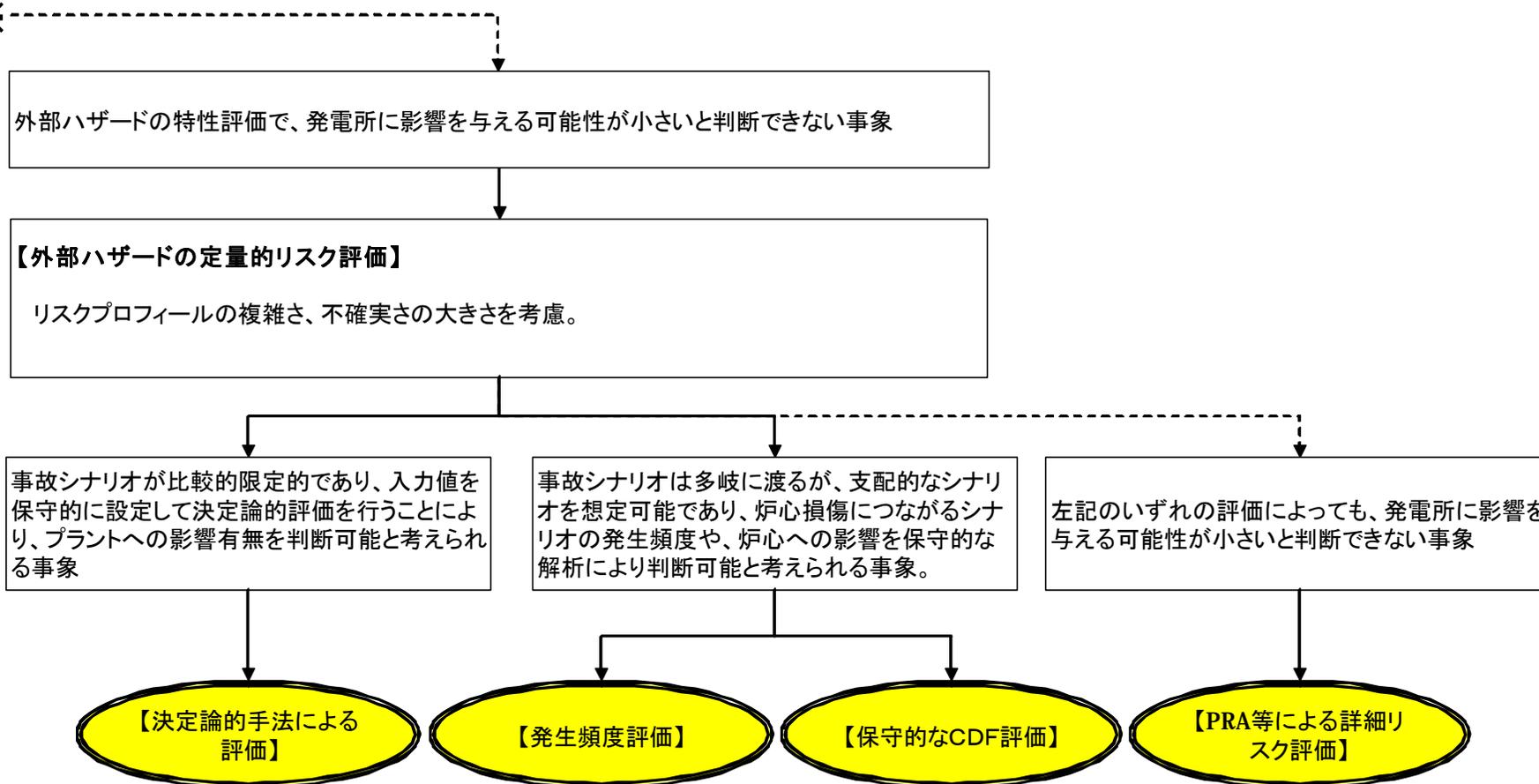
【基準3】ハザードが進展するタイムスケールがプラントでの対処時間と比べて十分に長い

【基準4】ハザードがプラントに到達したと仮定しても、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である。

# リスク評価手法の選択(#3-2)

## <評価方法選定の流れ>

※



# リスク評価手法の選択(#4)

外部ハザード毎に推奨する評価方法を検討、選択する。以下は、例である。

## 特性評価

基準1:ハザードの発生頻度が極めて小さいことが明確である。

- 「温度変化(夏の高温, 或いは(氷結(低温)))」ハザードは, 評価対象プラントの地理条件においては, 発生することはない。

基準2:ハザードがプラントに影響を与えるほど近傍で発生しない。

- 評価対象プラントの地理的領域(半径160kmの範囲)に火山は存在せず, 「降灰」を除く「火山噴出」に係わるハザードは, 発生しないと判断できる。

基準3:ハザードが進展するタイムスケールが, プラントでの対処時間と比べて十分に長い。

- 「海岸浸食」ハザードは, その進展に長時間を要するので, プラントにおいて対策を取る時間余裕が十分にある。

基準4:ハザードがプラントに到達したと仮定しても, 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である。

- 「霜」ハザードは, 発生したとしても, プラントに対して炉心損傷を引き起こす脅威にならない。

**定量的評価:**バウンディング解析などの保守的な解析により、炉心損傷につながるシナリオの発生頻度と影響を定量的に評価する。

**PRA:**リスクプロファイルが複雑で、PRAに依らなければリスク低減策を見出す重要なシーケンスを判断することができない事象に対して実施(地震、津波)

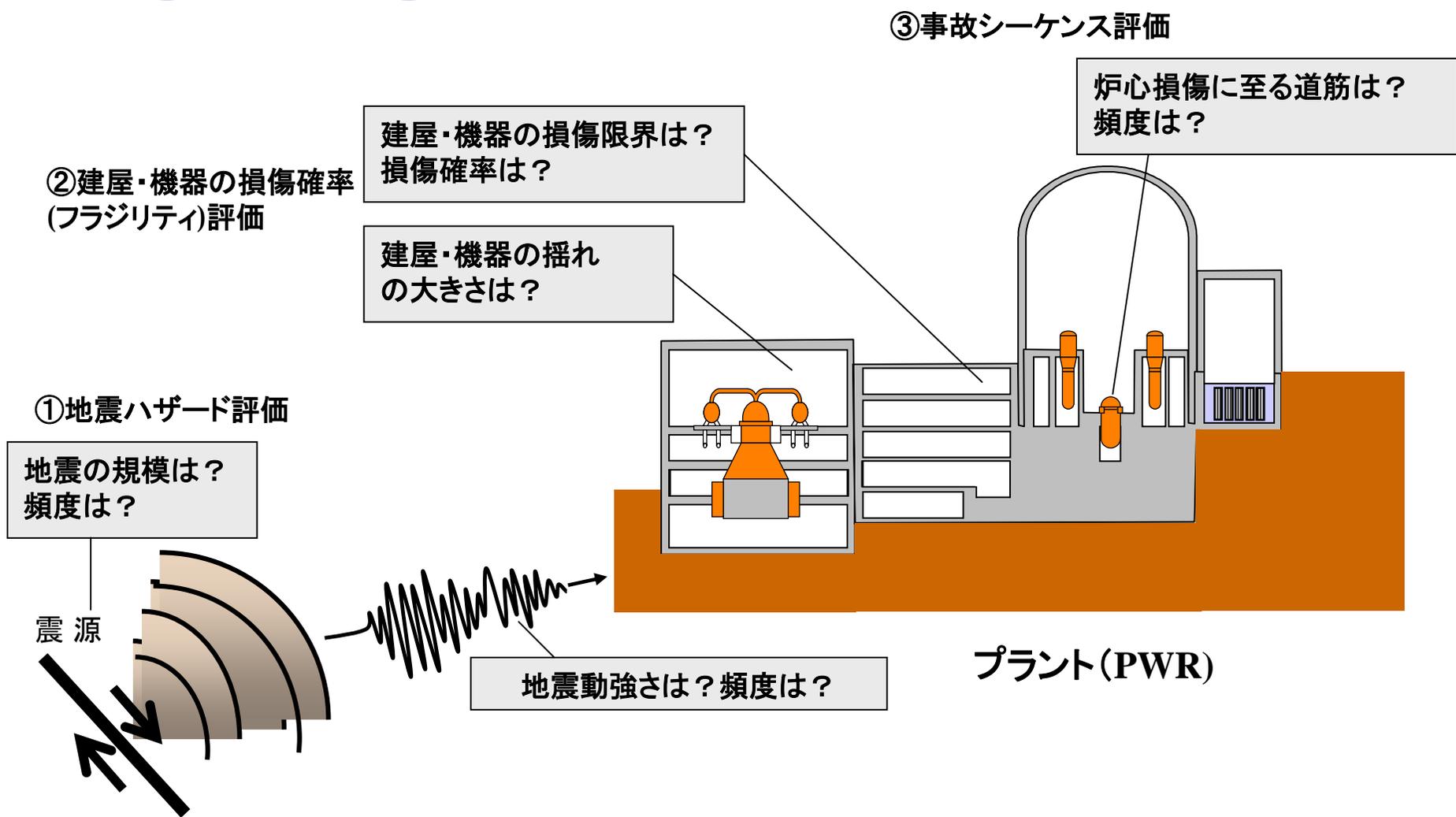
# 外的事象PRA手法の概要(#1)

- 外的事象PRAには、地震PRA、津波PRA、内部溢水PRA、内部火災PRAなどの種類がある。
- それぞれ手法に違いはあるが、大きな流れは同じ。
- 原子力学会では、それらのPRA手法の実施基準を策定している。

外的事象が内部外部からプラントを襲う。それにより、作用が働く。作用により、プラントの構造物、機器に影響が及ぼされる。そして影響が耐える性能を超えた場合に、構造物の破損、機器の故障などが起こる。多重性・多様性で構成されたプラントシステムの機器が連携して作動することに支障が出る可能性がある。

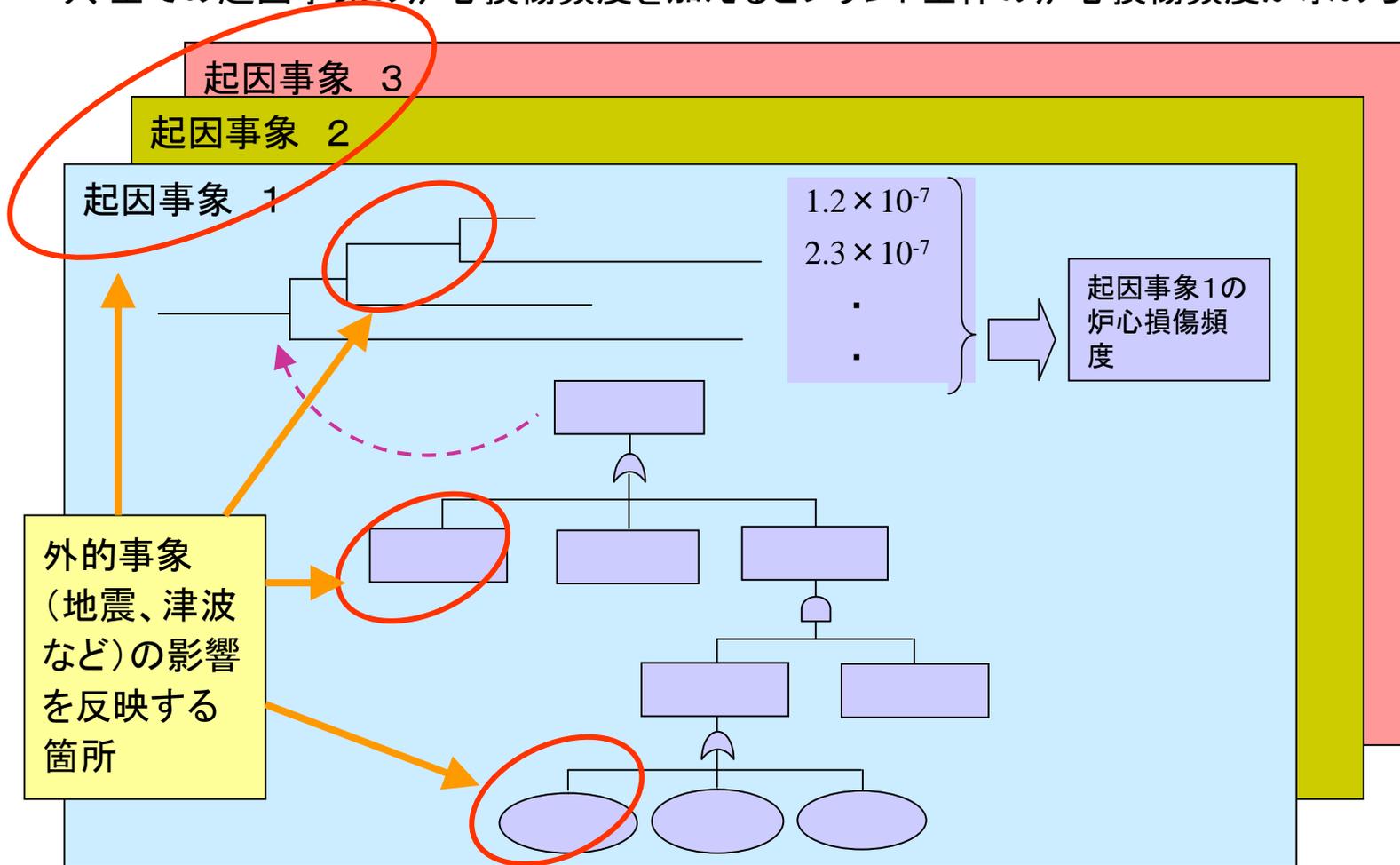
- (0) 事故シナリオ分析: 外的事象による事故の進展を網羅的に描く。
- (1) ハザード評価: ハザードの大きさと発生頻度を求める。
- (2) フラジリティ評価: ハザードの与える作用とそれに対する「耐えて機能を維持する性能」から、当該設備等の機能喪失確率を求める。
- (3) シーケンス評価: ハザードから作用を受けた設備等がプラントの安全機能にどういう影響を出現させるかを求める。内的事象PRAのシーケンス評価に比して、広範囲の複数の設備が影響を受ける。

# 外的事象PRA手法の概要(#2) 地震PRAの例

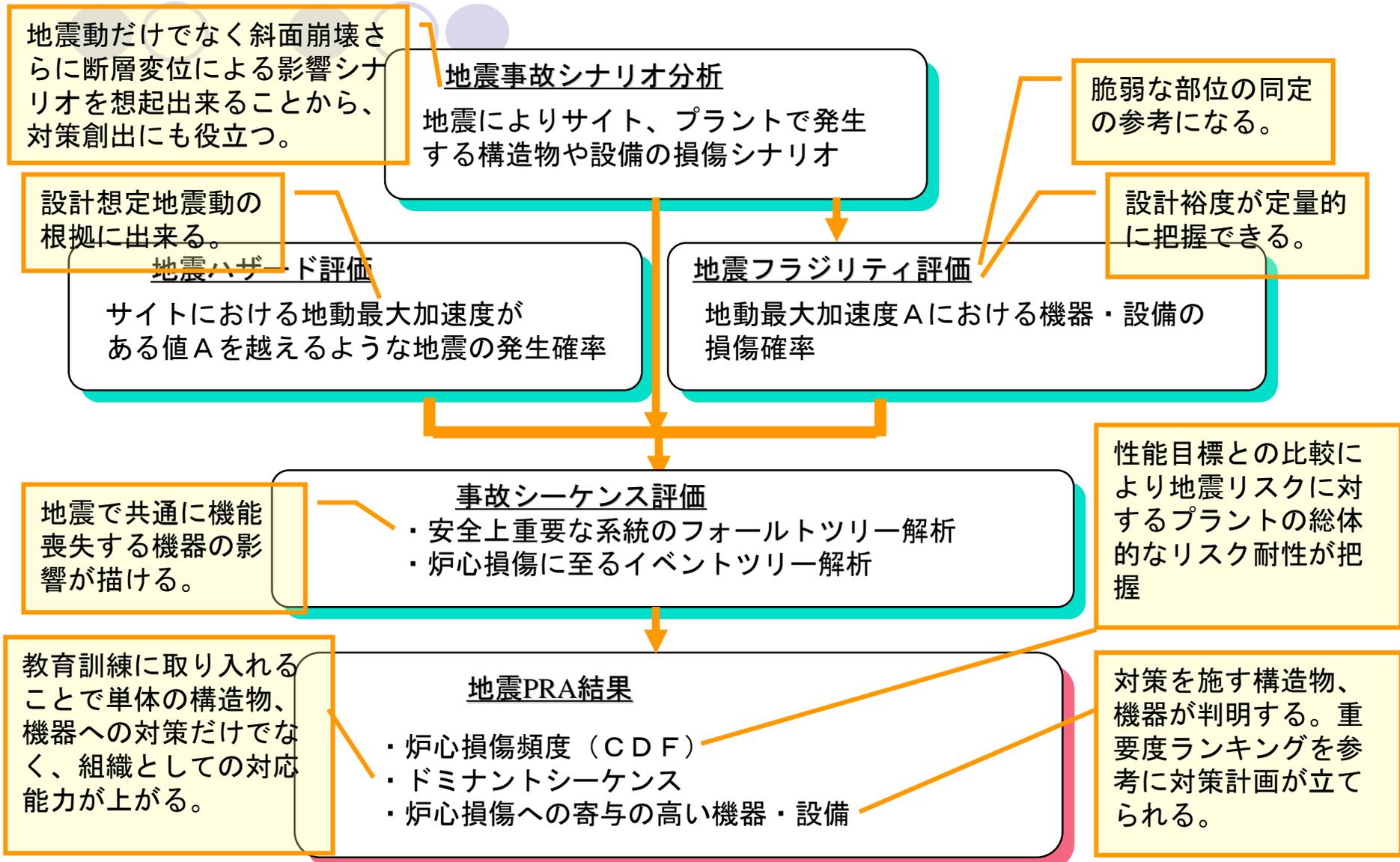


# 外的事象PRA手法の概要(#3)

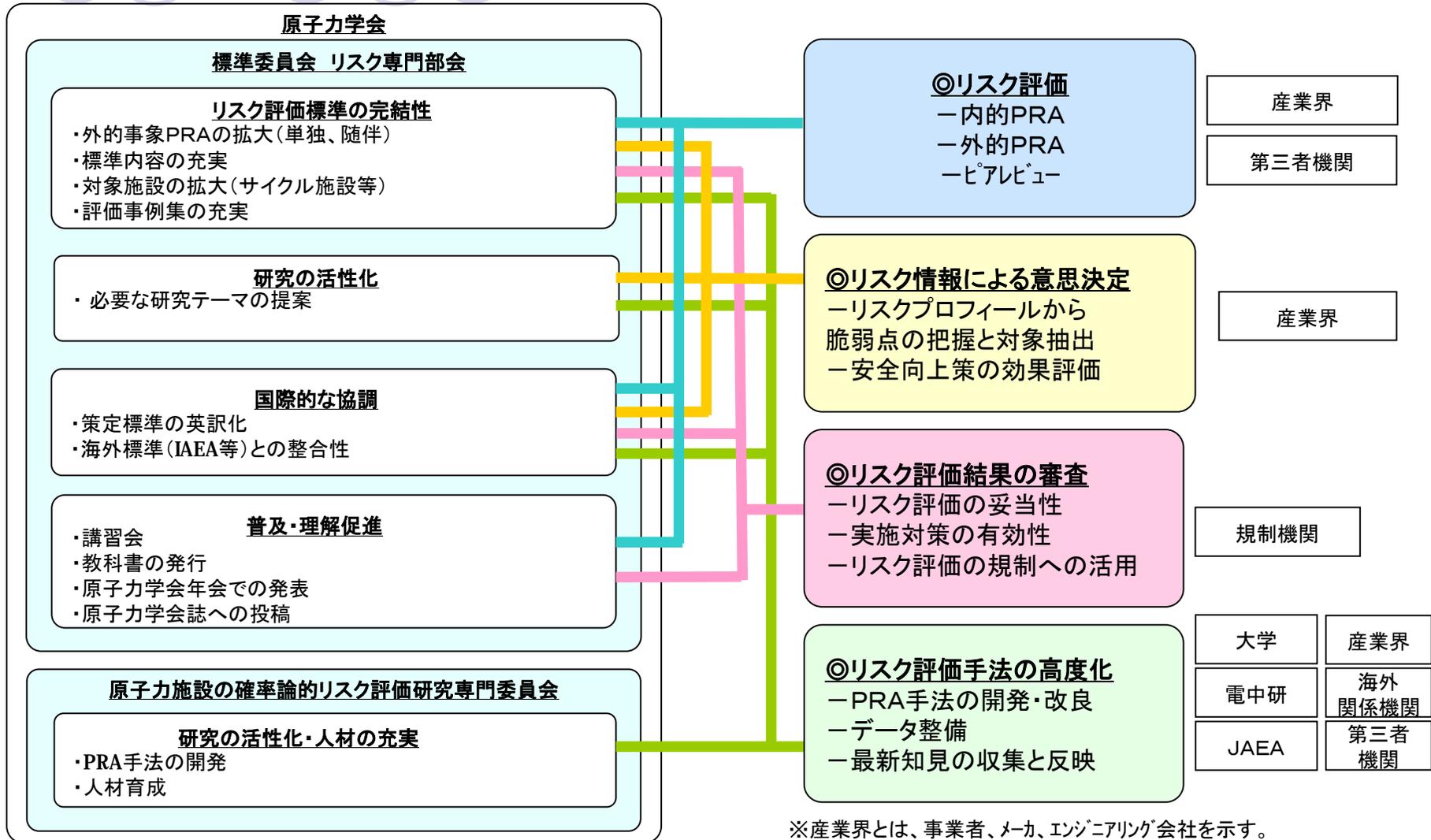
対象とするシステムの状態ごとに下記のET/FTにより頻度を算出する。起因事象ごとにET/FTがあり、全ての起因事象の炉心損傷頻度を加えるとプラント全体の炉心損傷頻度が求められる。



# 外的事象PRAからのメリット(運転中L1地震PRAの例)



# 原子力学会の活動(#1) ~PRAの品質確保と活用~



## 原子力学会の活動(#2)

分科会	策定標準	状況(2013. 9. 3)
レベル1PRA分科会	レベル1PSA標準:2008	改定作業中
レベル2PSA分科会	レベル2PSA標準:2008	発行済み
レベル3PSA分科会	レベル3PSA標準:2008	発行済み
レベル1PRA分科会	停止時PSA標準:2010	発行済み
レベル1PRA分科会	PSA用パラメータ推定標準:2010	発行済み
地震PRA分科会	地震PSA標準:2007	改定作業中。地震起因事象のフラジリティ評価を規定。
リスク情報活用ガイドライン分科会	リスク情報活用標準:2010	発行済み
津波PRA分科会	津波PRA標準:2011	改定(地震随伴への拡張)中。
内部溢水PRA分科会	内部溢水PRA標準2012	発行済み 地震起因内部溢水PRAへの拡張。
火災PRA分科会	内部火災PRA標準(案)	新規策定作業中
PRA品質確保分科会	PRA品質確保標準(案)	新規策定作業中
リスク専門部会	外部ハザードリスク評価方法選定実施基準	新規策定作業中
リスク専門部会	PRA共通用語集:2011	発行済み

## まとめ(1/2)

- リスク評価には多種の方法があるが、PRAは複雑な事象、不確実さの大きな事象、例えば外的事象などに適用することが有効。
- PRAの結果には不確実さを伴うが、そもそも不確実さを定量化する手法なので当然。しかし、不確実さの設定は困難。PRAはリスクに関してある程度確からしい情報を与えてくれる。過信してはいけないが、不信して使わないのは損。
- PRAの結果を意思決定に用いるには、データや手法(モデル)の改良を行なうこと、不確実さの扱いを決めることが必要。結果の数値だけでなく、リスクプロファイルを見出す分析能力も必要。

## まとめ(2/2)

- 福島第一原子力発電所の事故を経験し、特に外的な事象から受ける事態は、大きな影響を及ぼす可能性がある。このリスクに直視し、俎上に載せて議論することが重要。
- しかし、外的事象PRAは不確実さの大きさのため忌避感あり。
- それゆえ外的事象PRAは段階的に試行し経験を積むこと。
- 活用に耐えられる品質のPRAを確保できる実施基準を提供し、リスクへの理解促進・深化の機会を提供するのが、原子力学会の役目。
- 原子力学会標準委員会はリスク専門部会において、10に及ぶPRA実施基準を策定してきた。現在、3つを新知見を取り入れて改訂中。新規に3つの実施基準も策定中。また、PRAの理解と手法の周知のため、講習会を行なっている。実施基準の英訳も行い、海外とも情報共有できるようにしている。
- 原子力プラントの安全性の向上に実効的に役立つことを、リスクへの取り組みの局面から目指していきたい。

# おわりに

## リスクの語源

リスクという言葉はイタリア語の「*risicare*」に由来する、と言われている。この言葉は「勇気を持って試みる」という意味。この観点からすると、リスクは運命というよりは選択を意味している。われわれが勇気を持ってとる行動は、われわれがどれほど自由に選択を行えるかに依存しており、それはリスクの物語のすべてでもある。この物語こそリスクが人類にとって持つ意味を明らかにしてくれる。

*Peter L. Bernstein. 1996. AGAINST THE GODS*