

# 日本原子力学会標準

## 「原子力発電所に対する津波を起因とした 確率論的リスク評価に関する実施基準」

---

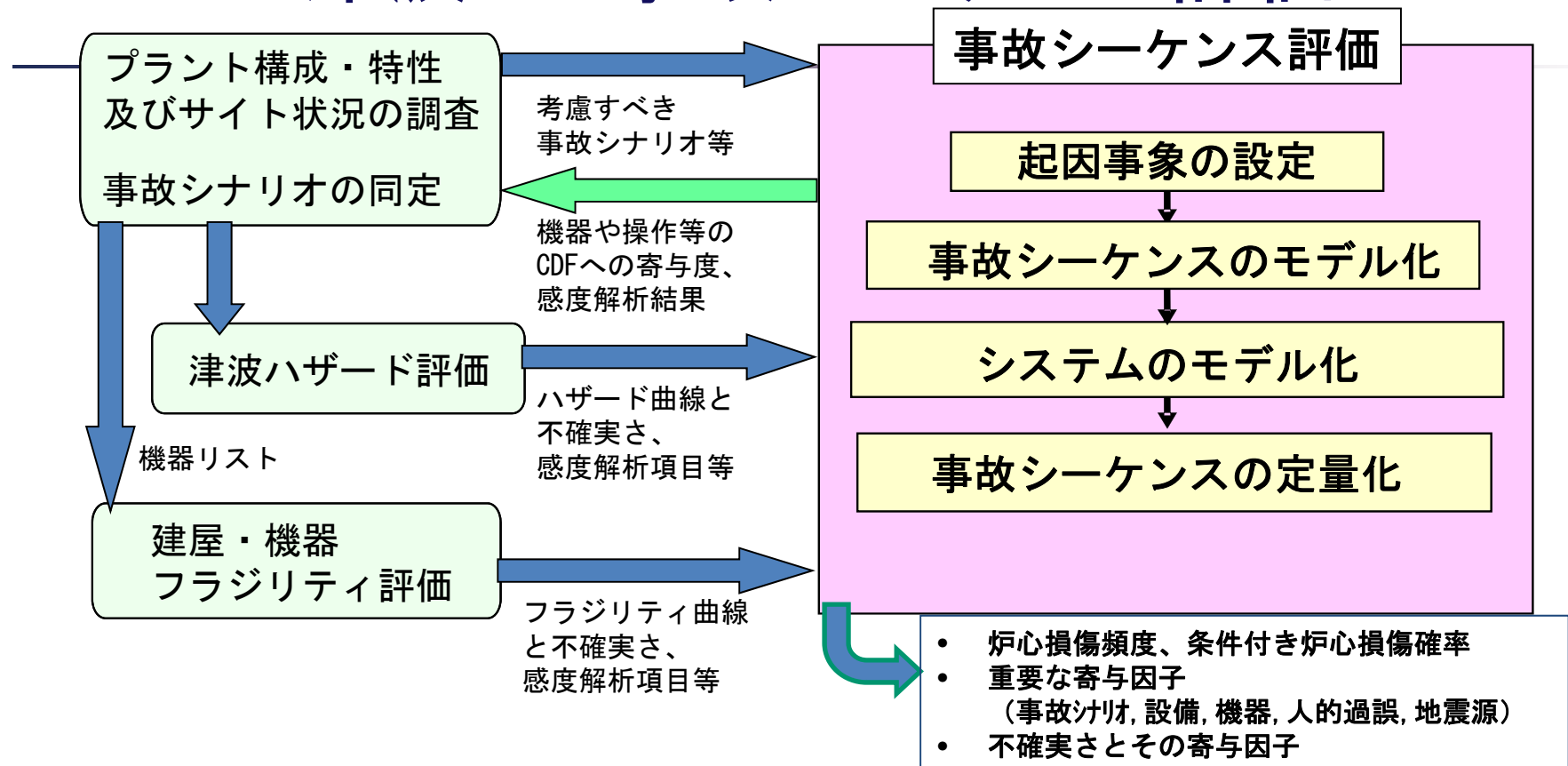
### 津波事故シーケンス評価の概要

2016年10月21日

日本原子力学会 標準委員会 津波PRA作業会

原子力エンジニアリング(NEL) 倉本 孝弘

# 津波PRA事故シーケンス評価



- 「プラント構成・特性及びサイト状況の調査」、「事故シナリオの同定」、「津波ハザード評価」、及び「建屋・機器フラジリティ評価」によって得られた情報を、**統合して事故シーケンス評価を実施する。**
- 炉心損傷頻度上重要な事故シーケンス、建物・構築物・機器(SSC)などを同定して、**起因事象の設定、事故シーケンスのモデル化、及びシステムのモデル化を行う。**
- このモデルを用いて、**事故シーケンスの定量化**を実施し、プラントの津波時における炉心損傷頻度等を算出すると共に、主要結果に対する分析を実施する。さらに、炉心損傷頻度等の不確実さとPRAの結果に影響する因子の感度を把握するため、**不確実さ解析および感度解析を実施する。**

# 津波PRA事故シーケンス評価の構成要素

## 起回事象の設定

- 起回事象の設定
- 津波によって誘発される起回事象の同定
- 起回事象をもたらすSSCsの設定

## 事故シーケンスのモデル化

- 安全機能の設定
- 成功基準の設定
- イベントツリーの作成

## システムのモデル化

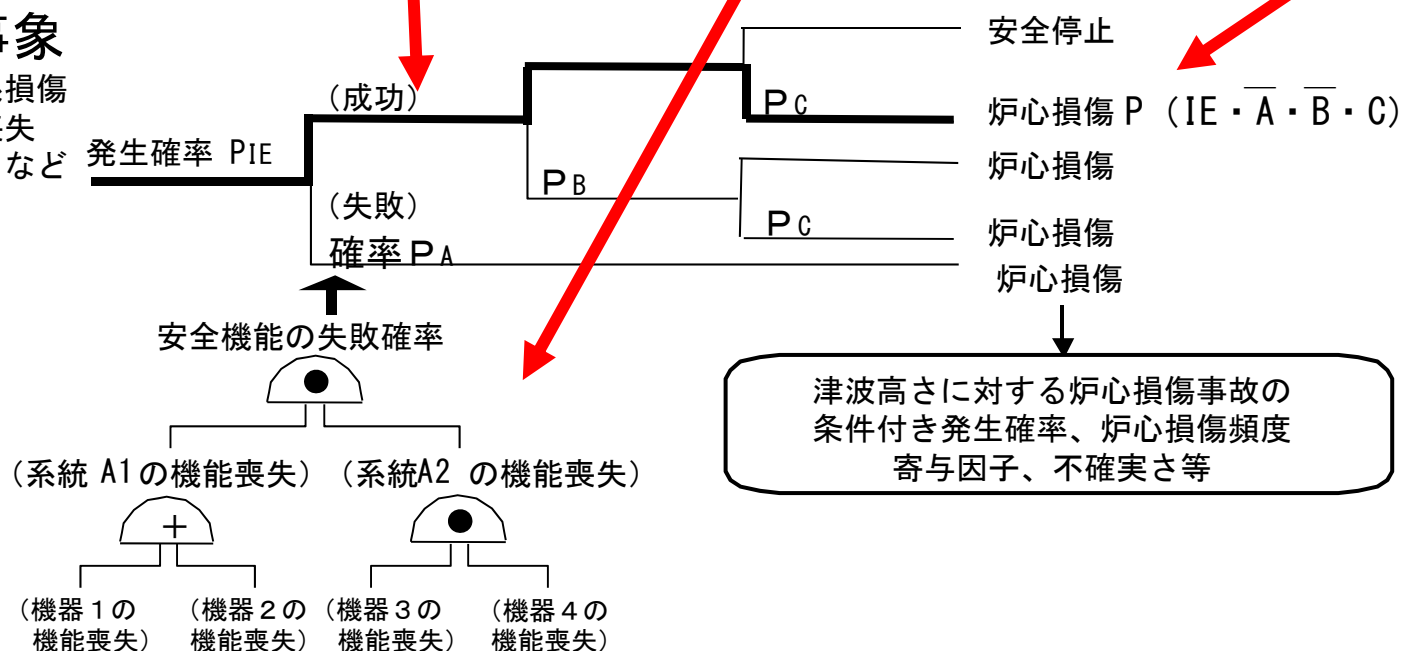
- モデル化の前提条件の設定
- 基事象のスクリーニングアウト
- フォールトツリーの作成 (ランダム故障と地震影響、人的過誤等を考慮)

## 事故シーケンスの定量化

- 事故シーケンス発生確率、頻度の評価
- 感度解析、不確かさ解析
- 重要度解析

### 起回事象

複数信号系損傷  
外部電源喪失  
過渡事象 など



# 起因事象の設定

## ■ 起因事象の同定、起因事象をもたらすSSCsの設定

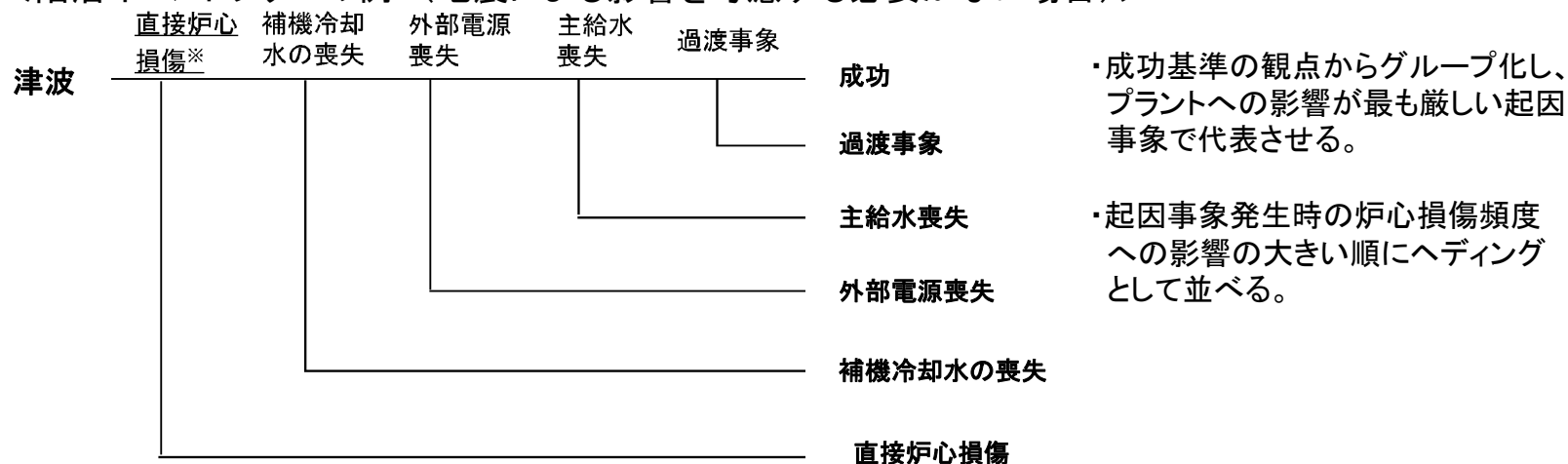
- a) 津波によるSSCsの損傷によって誘発される起因事象を設定する。ただし、地震による影響を考慮する必要がない場合は、津波到達時に原子炉が停止しているものとしてもよい。
- b) 設定した起因事象を対象として、これらの起因事象にかかる建物、構築物及び機器(SSCs)を設定するとともに、これらの起因事象が発生した場合の緩和設備の状態などを明確にする。

## ■ 起因事象の階層化

他の起因事象との同時発生の組み合わせを絞り込む方法として、起因事象の階層化を行ってもよい。

起因事象の階層化とは、津波発生時の影響の大きさに着目して、他の起因事象との同時発生の組み合わせを絞り込む方法であり、一般的に階層イベントツリーを用いる。

<階層イベントツリーの例（地震による影響を考慮する必要がない場合）>



※ 複数の信号系損傷

# 事故シーケンスのモデル化

- 安全機能の選定
- 成功基準の設定
- イベントツリーの作成

津波に起因して炉心損傷に至る事故シーケンスを分析しこれをモデル化する。

このためにはイベントツリー(ET)法を利用するのが一般的である。

起因事象について、津波後に炉心損傷を防止するために必要な安全機能の選定とその達成に必要な緩和設備の組み合わせである成功基準を設定し、これらを踏まえて各安全機能に対応する設備の動作/不動作をモデル化して、イベントツリーを構築する。

## 津波PRA特有の留意事項

- 津波の波力又は間接的な被災(漂流物の衝突等)などによるSSCsの損傷状態によっては、複数の緩和設備に影響を与え、炉心損傷が不可避となる場合がある。この場合、**影響を与える緩和設備の設定が困難**とも考えられ、SSCsの損傷が炉心損傷に直結するとしてもよい。
- 津波高さが低くても、機能喪失確率の高いSSCs並びにこのような設備に依存するSSCsは、津波浸水深の範囲によって、使用不可能と仮定し、**期待する緩和設備から除外**してもよい。
- **SA対策として整備された緩和設備、運転員操作**も、安全機能を達成するために必要な緩和設備などとして同定してもよい。(要員のアクセスが制限される可能性があることは考慮する。)
- 建屋内の同一区画にある同種機器のように、津波脆弱性がほとんど一致する場合には、簡略的な扱いとして、複数の同種の系統、機器を個別に設定しなくてもよい。**(完全相関として扱う)**
- 津波の浸水高が小さくても、**海底砂移動または長時間の引き波継続**によって十分な取水ができない場合があることを考慮する。
- 建屋内部への浸水が発生し、溢水の伝播を考慮する場合には、津波時特有の伝播経路として、**津波による空調ダクトの破損、トレンチからの浸水**などがあることを考慮する。
- 耐震性が低い機器が損傷する可能性や水密扉などの水密性能が劣化する可能性、道路の地割れ・斜面崩壊によるアクセス性が阻害される可能性など、**地震動による損傷の形態・損傷の時期に依存した組合せ**について考慮する。

# システムのモデル化

事故シーケンスの分析で決定されるETのヘディング(分岐)に対して、対象となるシステムの津波時におけるシステム信頼性を評価するための論理モデルを作成する。

## ■ モデル化の前提条件の設定

- システムの境界条件、フロントライン系／サポート系、必要な運転操作、基事象のスクリーニング基準などを明確にする。

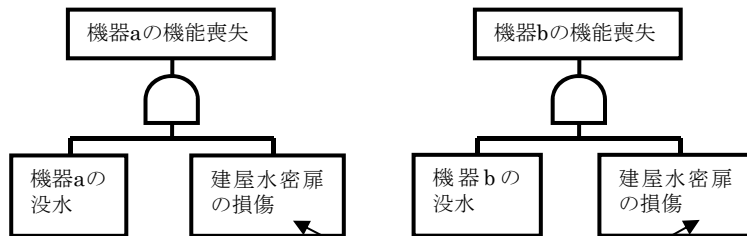
## ■ フォールトツリー(FT)の頂上事象の設定

## ■ FTの作成

- 津波による損傷
- ランダム故障
- 人的過誤

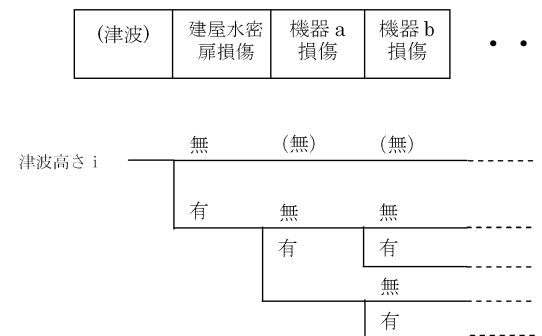
津波PRAの人的過誤評価でも、内的事象PRAと同様の手法 (THERP手法等)を用いる。  
ただし、津波時のストレス因子、津波後の復旧操作において、特有の考慮が必要。

＜フォールトツリーでの津波による損傷の考慮＞  
フォールトツリー結合法にて評価を行う場合



従属性をモデル化

＜イベントツリーでの津波による損傷の考慮＞  
条件付き分岐確率イベントツリー法にて評価を行う場合



# 事故シーケンスの定量化(1/3)

起因事象の設定、事故シナリオの分析、システムのモデル化、津波ハザード評価、建屋・機器フラジリティの結果に基づき、各事故シーケンス及び炉心損傷の発生頻度を不確実さを含めて評価する。

➤ 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:

$$CDF_i = \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} h(h) \cdot P(h, a) \cdot Q_i(h, a) da dh \quad (1)$$

$h(h)$ : 津波高さ  $h$  における津波発生頻度

$P(h, a)$ : 津波高さ  $h$  における地震動強さ  $a$  の結合確率

$Q_i(h, a)$ : 津波高さ  $h$  における地震動強さ  $a$  に対して炉心損傷に至る事故シーケンス  $i$  の条件付き発生確率

$h_{\max}$ : 考慮する津波高さの上限(これ以上大きな津波高さを考慮しても炉心損傷頻度への影響の増加が無視できる程度になる津波高さ)

$h_{\min}$ : 考慮する津波高さの下限(内的事象との重複を避ける津波高さ; 安全に関連する機器の津波による損傷の下限など)

$a_{\max}$ : 考慮する地震動つよさの上限(これ以上大きな津波高さを考慮しても炉心損傷頻度への影響の増加が無視できる程度になる津波高さ)

$a_{\min}$ : 考慮する津波高さの上限(これ以上大きな津波高さを考慮しても炉心損傷頻度への影響の増加が無視できる程度になる津波高さ)

➤ 津波高さ  $h$  の発生頻度 ( $h(h)$ ) の算出:

$$h(h) = - \frac{dH(h)}{dh} \quad (2)$$

津波ハザード曲線  $H(h)$ : 津波高さ  $h$  を超える津波発生の年超過頻度

➤ 炉心損傷頻度  $CDF_{\text{Total}}$  の算出:

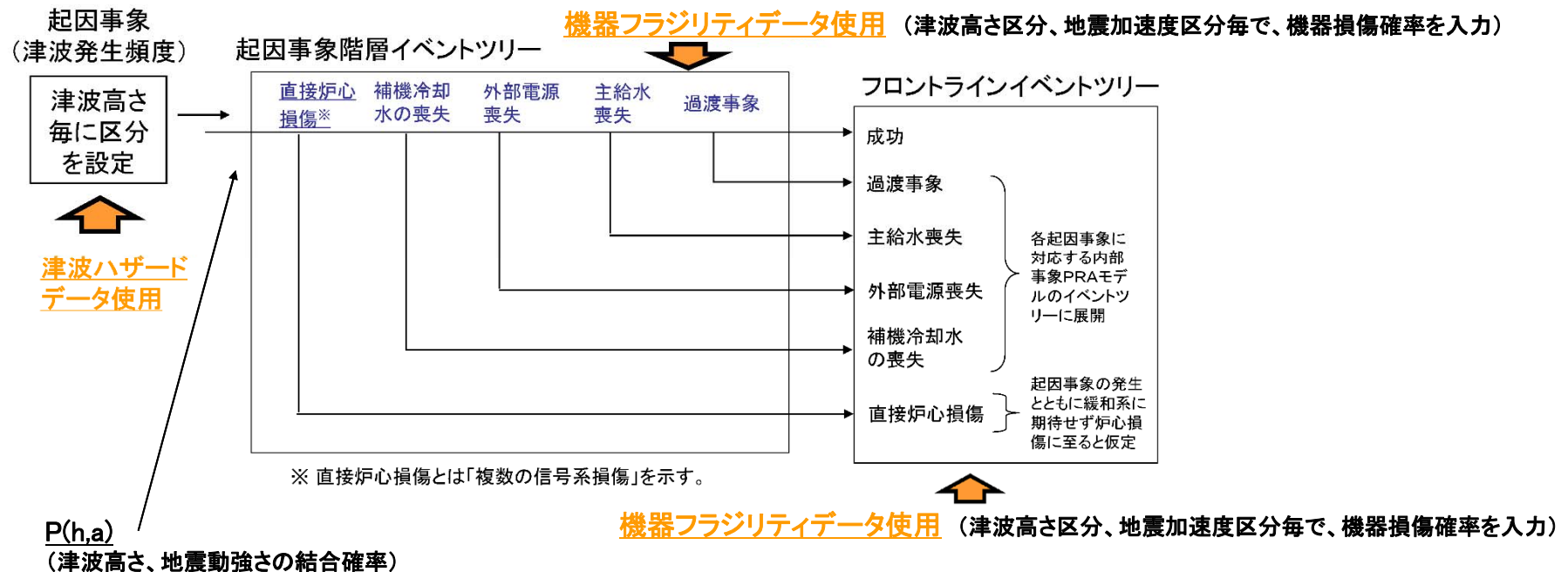
$$CDF_{\text{Total}} = \sum_i CDF_i \quad (3)$$

# 事故シーケンスの定量化(2/3)

$Q_i(h, a)$ を建屋・機器 fragility 及び人的過誤確率／機器のランダム故障確率などの評価結果、イベントツリー／フォールトツリーを用いて評価

定量評価手法(3種類のいずれも利用可)

- フォールトツリー結合法
- 条件付き分岐確率イベントツリー法
- モンテカルロ(MCS)法





# 事故シーケンスの定量化(3/3)

## 津波高さ別炉心損傷確率・炉心損傷頻度の評価例

