

令和7年度  
JAEA-NRA安全研究成果報告会

地震PRAで用いる設備の同時損傷確率の  
算定手法の提案

令和7年11月13日

原子力規制庁長官官房技術基盤グループ  
地震・津波研究部門  
藤原 啓太

本報告は、PSAM17&ASRAM2024(令和6年10月開催)において公表した成果※の一部をまとめたものである。

※Keita Fujiwara, Toshio Teragaki, Kenta Hibino and Kotaro Kubo, Study on a Method for Evaluating the Seismic Fragilities Considering the Response Correlation for Seismic PRA, PSAM17 & ASRAM2024, 2024.



# 背景

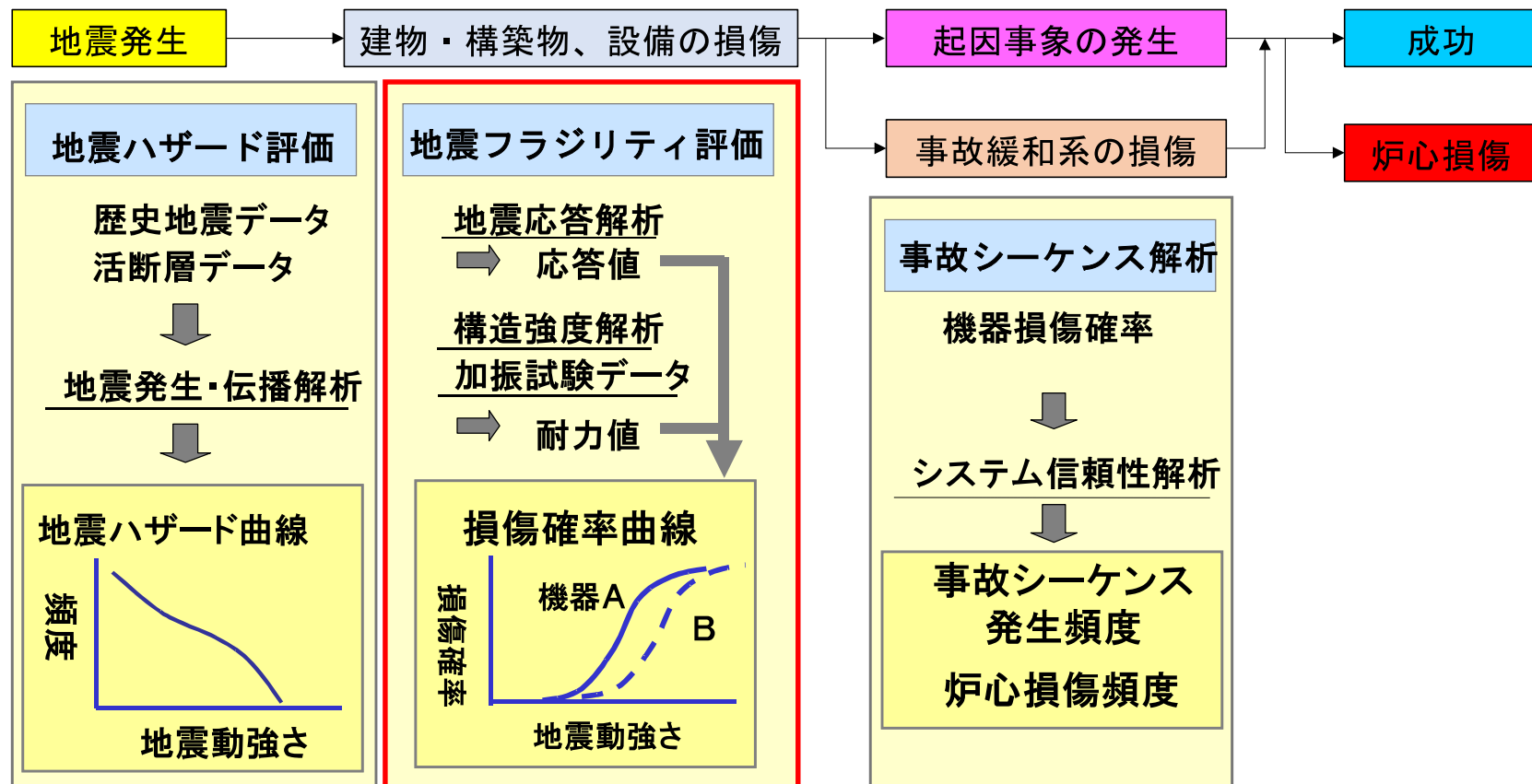
---

- 令和2年4月に新たな原子力規制検査が施行され、内部事象を対象とした事業者PRAモデルを用いた内部事象PRAから得られるリスク情報を活用した検査指摘事項に対する安全重要度評価（SDP評価）が開始された。
- 自然災害に関する日本の地域特性を勘案すると、今後は地震等の外部事象を対象としたPRAから得られるリスク情報を活用する必要がある。
- 地震特有の事象として、同一サイト内に設置された設備が地震動による影響を同時に受けるため、設備の振動特性、設置条件等を踏まえた「応答の相関性を考慮した同時損傷確率」を算定することが重要である。



# 地震PRAの概要

- 対象サイトで想定される地震動強さ・発生頻度及び地震が発生した時の建屋・構築物、設備の損傷確率を評価する。これらの評価結果から事故シーケンス解析を行い、炉心が損傷する頻度等のリスクを体系的に評価する。



本研究の対象

図1 地震PRA実施の流れ

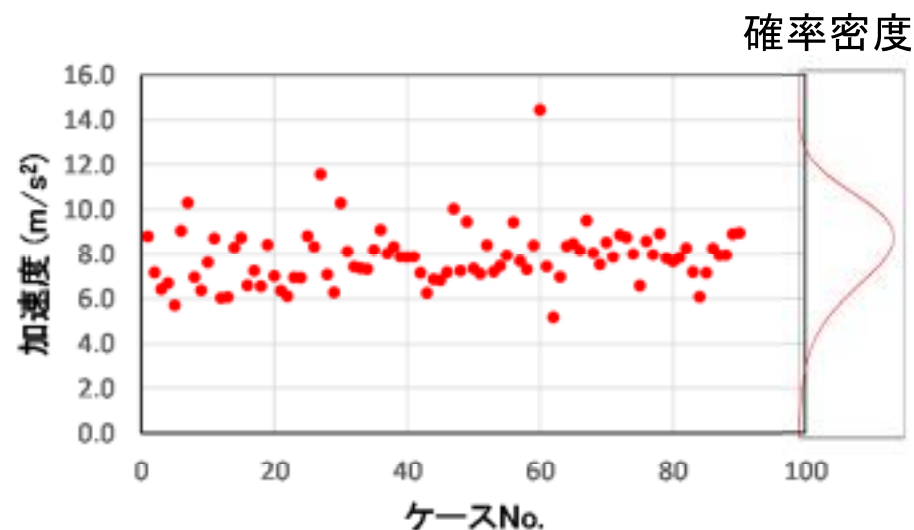
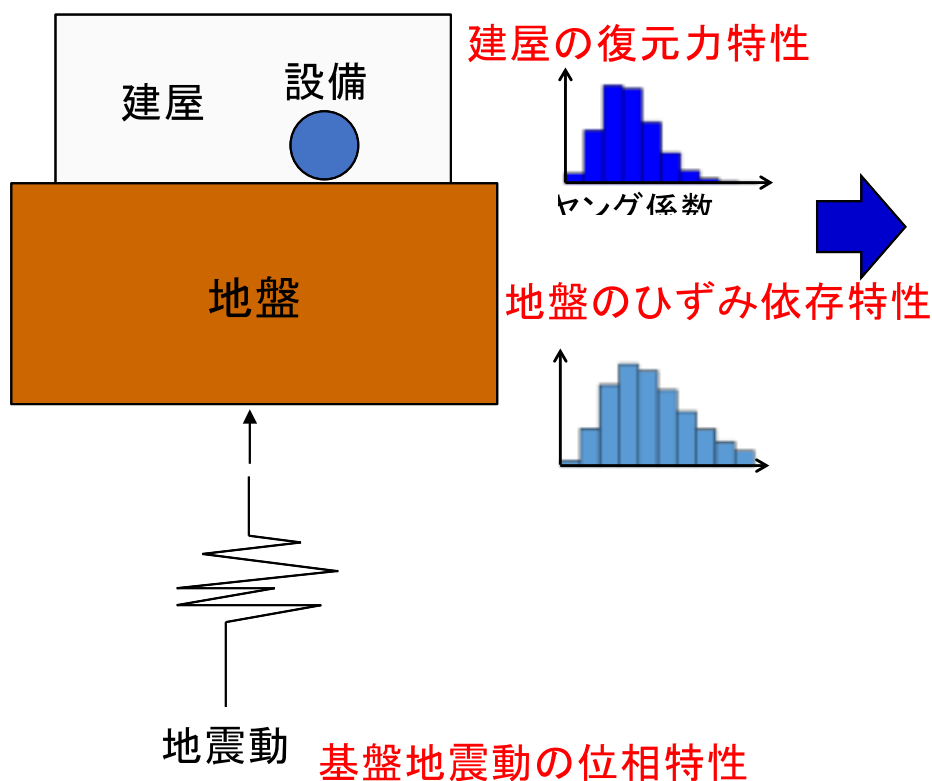


# 地震PRAにおける設備の脆弱性評価の概要

- 原子力施設が設置されるサイトにおいては様々な特性の地震が発生することが考えられる。
- 地盤や建屋は材料物性等に起因する不確かさを有する。

➡ 設備の脆弱性評価では現実的応答(下図)及び現実的耐力を確率量として評価し、損傷確率を評価している。

不確かさを考慮した複数回の地震応答解析を実施



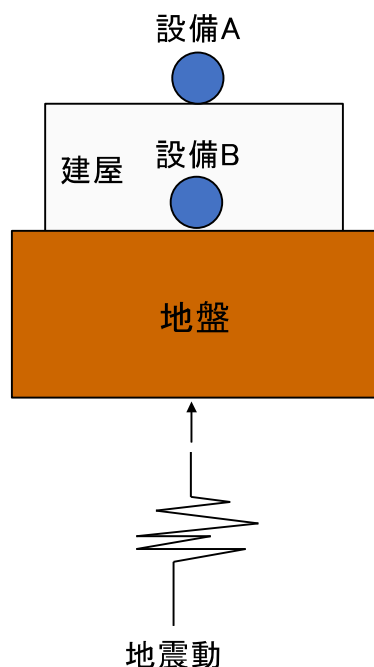
不確かさを考慮した地震応答解析による設備の応答の評価例

図2 設備の現実的応答の評価手順の流れの例

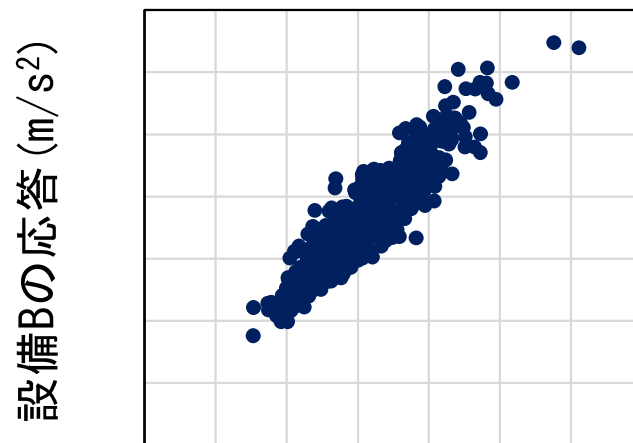


# 地震時の設備の応答の特徴

- 設備の振動特性、設置条件等の類似性に応じ、発生する応答に相関性があると考えられる。
- 応答の相関性が強い場合、一方の設備が地震によって損傷する時、他方の設備も損傷している可能性が高いと考えられる。



応答の相関係数 $\rho=0.92$



設備Aの応答加速度 ( $\text{m/s}^2$ )

図3 不確かさを考慮した地震応答解析によって得られた設備AとBの応答の関係の例

➡ 設備の同時損傷確率の算定において応答の相関性を考慮することが重要



# 既往の設備の同時損傷確率算定手法の例※

- モンテカルロ法等を用い、応答の相関係数、現実的応答及び現実的耐力の確率分布から応答及び耐力をサンプリングし、損傷確率を算定する。

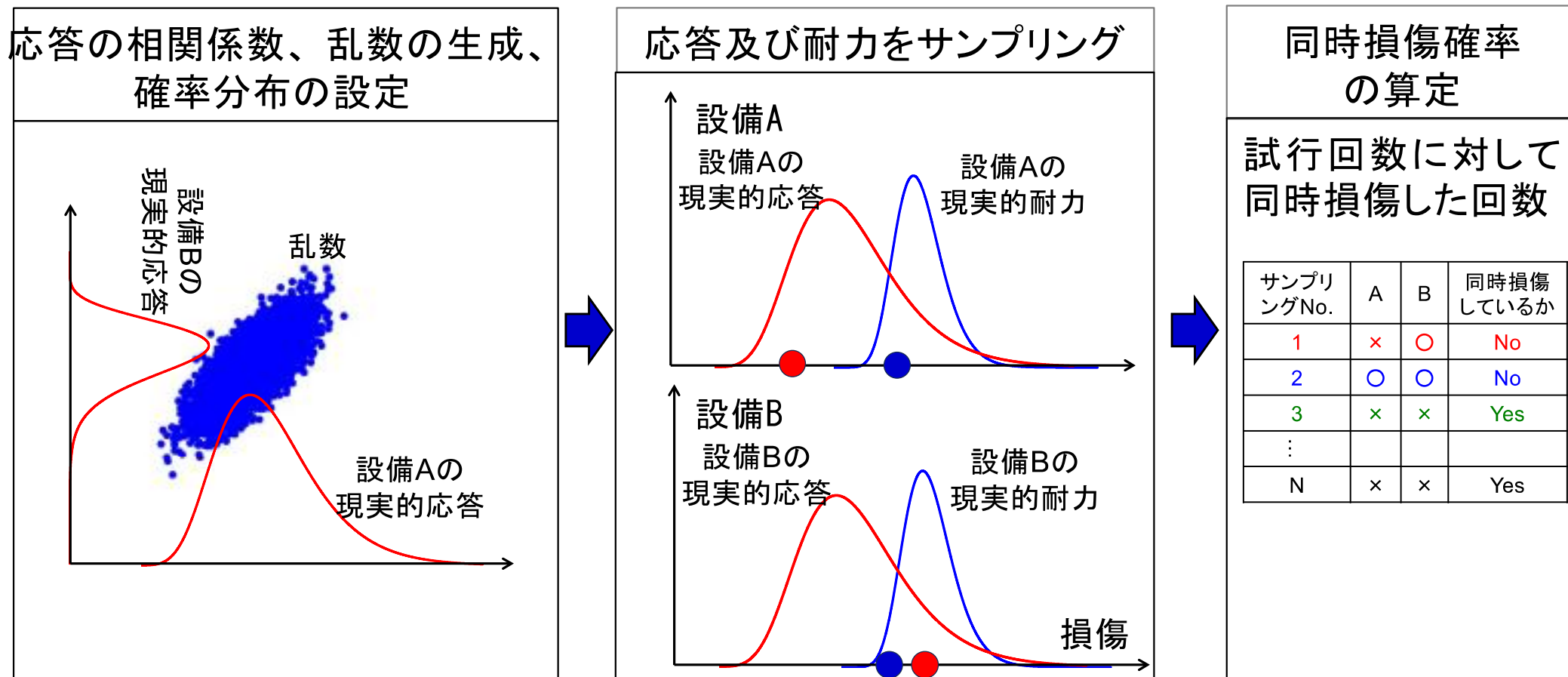
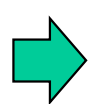


図4 「モンテカルロ法を用いた損傷相関の評価手法」による設備の同時損傷確率算定の流れ



現実的応答の確率分布及び相関係数の設定が必要であり、それらの設定は容易ではない



# 研究目的・実施内容

---

## 研究目的

- 地震PRAのための設備の同時損傷確率の算定において、現実的応答の確率分布及び相関係数の仮定が不要となる新たな手法を提案する。

## 実施内容

- 設備の同時損傷確率算定において、設備の現実的応答及びそれらの相関性を直接取り扱う手法を考案する（提案手法）。
- 提案手法及び既往手法を用いて設備の同時損傷確率の試算を行い、その結果を比較する。



# 提案する算定手法

- モンテカルロ法等による不確かさを考慮した地震応答解析から得られる設備の応答を直接用いて同時損傷確率を算定する手法を考案する。

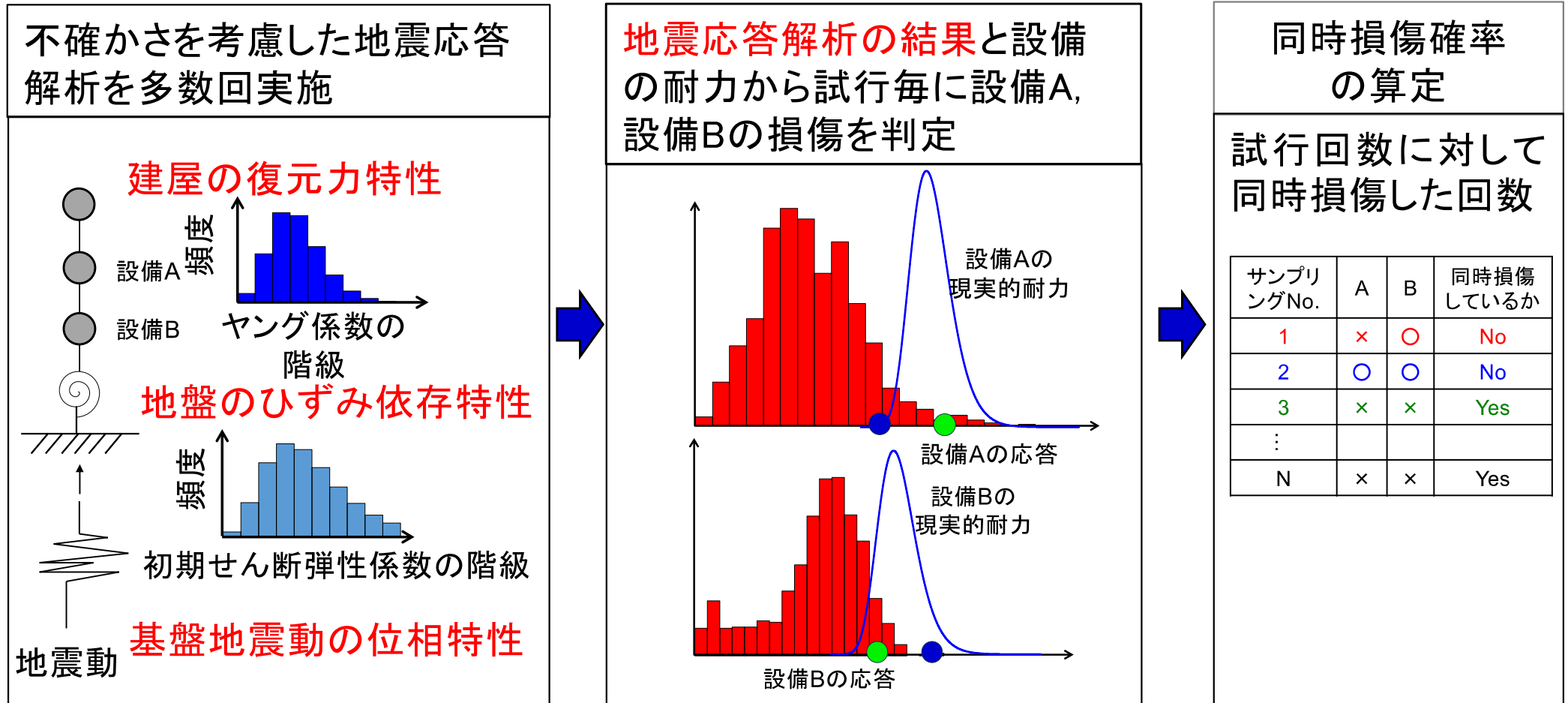
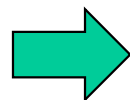


図5 提案手法による設備の同時損傷確率算定の流れ



現実的応答の確率分布及び相関係数の仮定が不要



# 試算の概要

## 試評価の対象

- 仮想PWRの原子炉建屋※<sup>1</sup>内の異なる質点に設置された同一周期の2つの設備を対象に同時損傷確率の試評価を行った。
- 組合せは質点23とこれ以外の質点(質点24及び25を除く)を対象とした。

## 比較対象の手法

- 比較対象の既往手法として、数学的に相関性を考慮できる「損傷の相関係数を用いる評価手法※<sup>2</sup>」を用いた。なお、現実的応答は対数正規分布に従うことを仮定した。

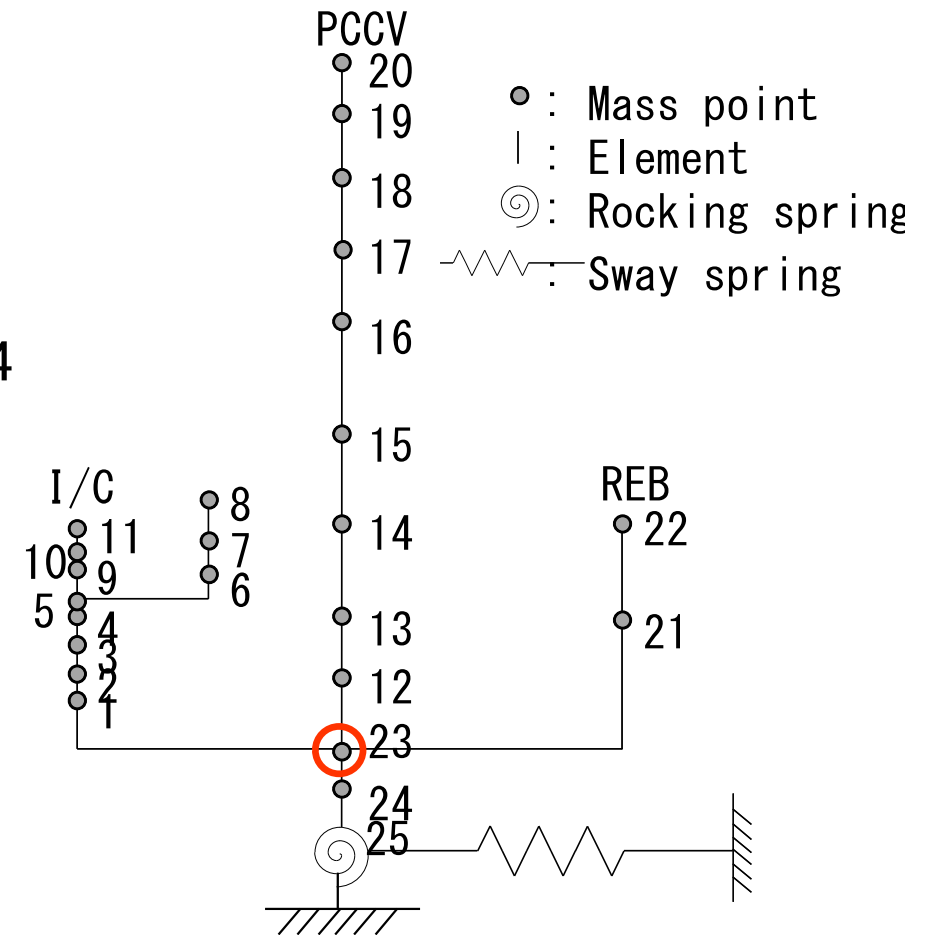


図6 PWR原子炉建屋の  
地震応答解析モデル

※<sup>1</sup> 日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」、1987年

※<sup>2</sup> M.P. Bohn, L.C. Shieh, J.E. Wells, L.C. Cover, D.L. Bernreuter, J.C. Chen, J.J. Johnson, S.E. Bumpus, R.W. Mensing, W.J. O'Connell and D.A. Lappa, Application of the SSMRP Methodology to the Seismic Risk at the Zion Nuclear Power Plant (NUREG/CR-3428), 1983.



# 試算の条件(1/2)

## 地震応答解析の条件

- ・不確かさを考慮した地震応答解析において考慮する不確かさ要因及びそれらの確率分布は、日本原子力学会の学会標準※を参考に設定した。

表1 地震応答解析の条件

| 項目    | 手法                     | 不確かさの要因    |
|-------|------------------------|------------|
| 基盤地震動 | 一様ハザードスペクトル(UHS)を用いる手法 | 位相特性(乱数位相) |
| 地盤    | —*                     | 初期せん断弾性係数  |
| 建屋    | 非線形時刻歴応答解析             | コンクリート強度   |
|       |                        | 減衰定数       |
|       |                        | 復元力特性      |

\*原子炉建屋が硬岩サイトに設置されることを想定し、地盤ばねの算定における初期せん断性係数の不確かさのみ考慮した。

※日本原子力学会「原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準:2015」(AESJ-SC-P006:2015)、2015年



## 試算の条件(2/2)

### 現実的応答

表2 現実的応答評価に係る条件

| 項目     | 設定                                                  |
|--------|-----------------------------------------------------|
| 現実的応答  | 設備の応答は1自由度系でモデル化<br>(減衰5%, 周期:0.05, 0.1, 0.3, 0.5秒) |
| サンプリング | モンテカルロ法(試行回数:1000回)                                 |
| 地震動レベル | 400Gal, 1200Gal                                     |

### 現実的耐力

- 現実的耐力は、既往手法による設備単一の損傷確率が0.5となるよう地震応答解析の結果から得られる現実的応答(対数正規分布を仮定)の中央値と同様の値と仮定し、不確かさは考慮しないこととした。

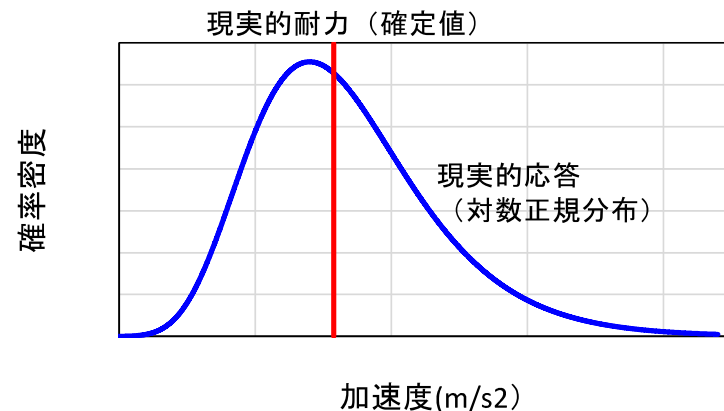
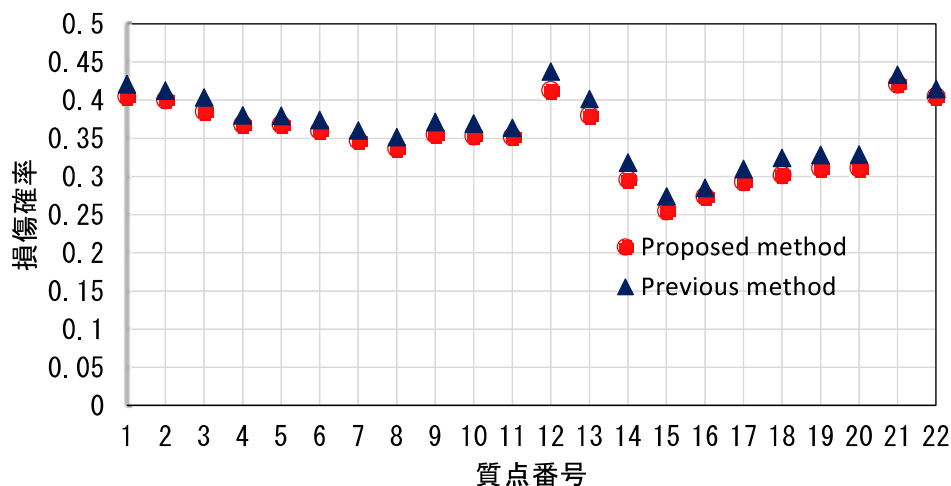


図7 現実的耐力の設定における仮定

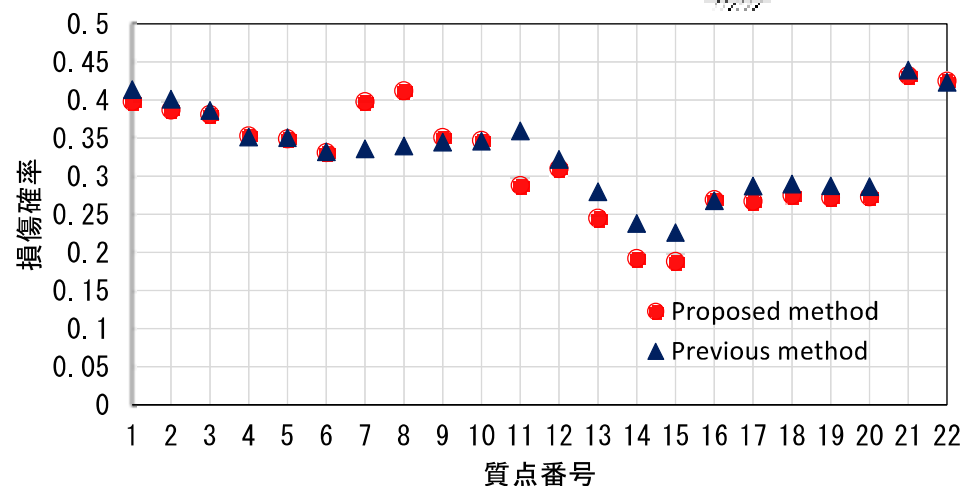


# 結果及び考察(1/2)

## 設備の同時損傷確率の試算結果



(a) 400Gal



(b) 1200Gal

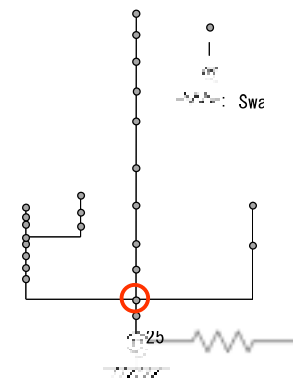


図8 2つの設備の同時損傷確率(周期:0.1秒)

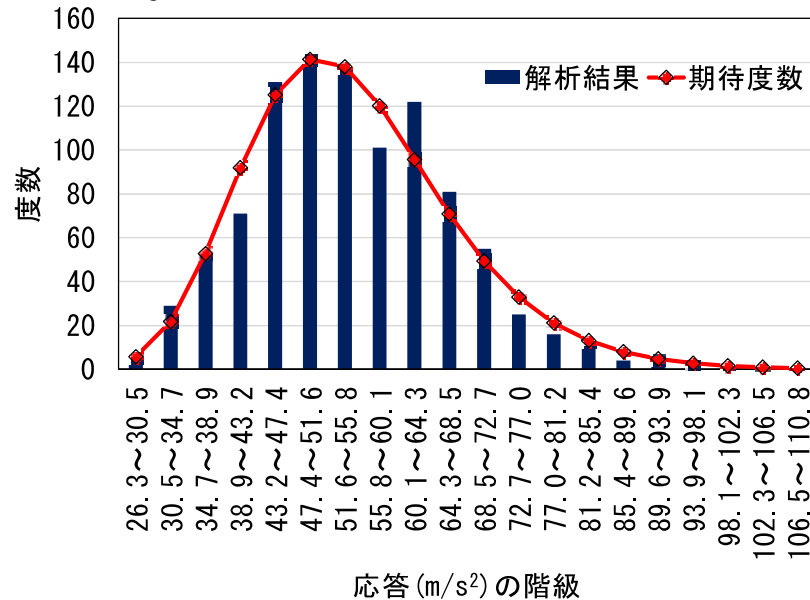
- 400Galの場合、両手法の結果は概ね一致することが確認された。
- 1200galの場合、一部の質点について両者の結果に差が生じることが確認された。



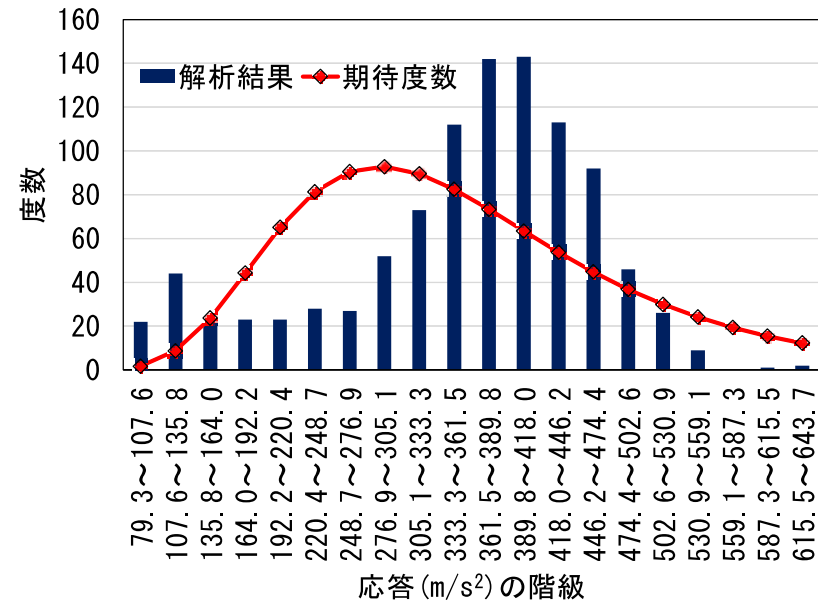
## 結果及び考察(2/2)

### 試算結果に差が生じている原因の分析

- 既往手法において現実的応答の確率分布に対数正規分布を仮定したことの妥当性を確認するため、地震応答解析結果のヒストグラムを確認した。



(a) 400 Gal



(b) 1200 Gal

図9 応答加速度のヒストグラム(質点8, 周期0.1秒)

- 400Galの場合、対数正規分布に従っていると言える。
- 1200Galの場合、対数正規分布に従っているとは言えないため、既往手法の適用にあたり現実的応答の確率分布に対数正規分布を仮定したことが原因で試算結果に差が生じていると考えられる。



# 結論・今後の研究課題

---

## 結論

- 現実的応答の確率分布及び相関係数の仮定が必要ない、モンテカルロ法等による不確かさを考慮した地震応答解析から得られる設備の応答を直接用いた設備の同時損傷確率算定手法を考案し提案
- 設備の同時損傷確率の試算の結果、400Galの場合、両手法の結果は概ね一致すること、1200Galの場合、一部の試算結果に差が生じることを確認
- 既往手法の適用にあたっては現実的応答に仮定する確率分布の設定に注意が必要

## 今後の研究課題

- 提案手法を用いた既往手法を用いる場合の留意点の整理
- 地震時の応答の相関性がリスク評価結果に及ぼす影響の把握



---

## 【参考文献】

- Keita Fujiwara, Toshio Teragaki, Kenta Hibino and Kotaro Kubo, Study on a Method for Evaluating the Seismic Fragilities Considering the Response Correlation for Seismic PRA, 17th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management & Asian Symposium on Risk Assessment and Management (PSAM17&ASRAM2024), 2024.
- 日本原子力研究所「軽水炉モデル地震 PSA 報告書」(JAERI-Research 99-035)、平成 11 年
- 日本原子力学会「原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準:2015」(AESJ-SC-P006:2015)、2015年
- 日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」、1987年
- M.P. Bohn, L.C. Shieh, J.E. Wells, L.C. Cover, D.L. Bernreuter, J.C. Chen, J.J. Johnson, S.E. Bumpus, R.W. Mensing, W.J. O'Connell and D.A. Lappa, Application of the SSMRP Methodology to the Seismic Risk at the Zion Nuclear Power Plant (NUREG/CR-3428), 1983.



---

## 參考資料



# 損傷の相関係数を用いる評価手法

- 任意の地震動強さ  $\alpha$  における設備  $j$  及び  $k$  の同時損傷確率  $P_{siml.}(\alpha)$

$$P_{siml.}(\alpha) = (2\pi)^{-1} (|\mathbf{V}|)^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{u_j} \int_{-\infty}^{u_k} \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-\rho_{j,k}^2)} (x_j(\alpha)^2 - 2\rho_{j,k}x_j(\alpha)x_k(\alpha) + x_k(\alpha)^2) \right\} dx_j dx_k.$$

$x$ : 確率変数,  $\mathbf{V}$ : 相関行列

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{j,k} \\ \rho_{j,k} & 1 \end{bmatrix}.$$

$\rho_{j,k}$ : 損傷の相関係数

$$\rho_{j,k} = \frac{\beta_{Rj} \cdot \beta_{Rk}}{\sqrt{\beta_{Rj}^2 + \beta_{Cj}^2} \cdot \sqrt{\beta_{Rk}^2 + \beta_{Ck}^2}} \rho_{Rj,Rk} + \frac{\beta_{Cj} \cdot \beta_{Ck}}{\sqrt{\beta_{Rj}^2 + \beta_{Cj}^2} \cdot \sqrt{\beta_{Rk}^2 + \beta_{Ck}^2}} \rho_{Cj,Ck}.$$

$\rho_R$ : 応答の相関係数,  $\rho_C$ : 耐力の相関係数

$\beta_R$ : 現実的応答の対数標準偏差

$\beta_C$ : 現実的耐力の対数標準偏差

積分の上限値

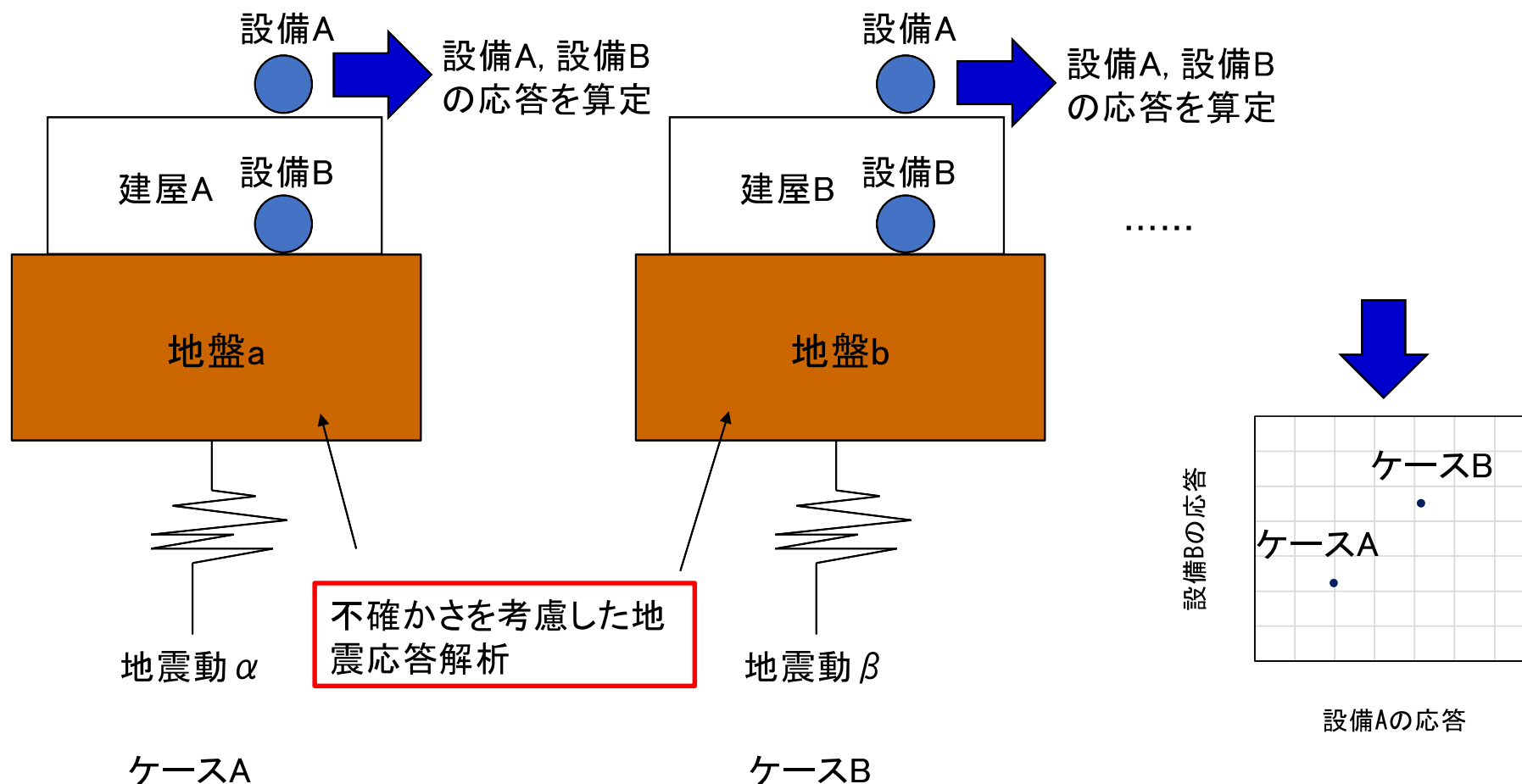
$$u_j = \frac{\ln(R_{mj}/C_{mj})}{\sqrt{\beta_{Rj}^2 + \beta_{Cj}^2}} \text{ 及び } u_k = \frac{\ln(R_{mk}/C_{mk})}{\sqrt{\beta_{Rk}^2 + \beta_{Ck}^2}}. \quad \begin{array}{l} R_m: \text{現実的応答の中央値} \\ C_m: \text{現実的耐力の中央値} \end{array}$$



# 相関係数の設定方法(1/3)

## ◆ 地震応答解析によって求める方法

- 同一建屋の異なるフロアに設置された同一周期の2つの設備(設備A, 設備B)の組合せの場合



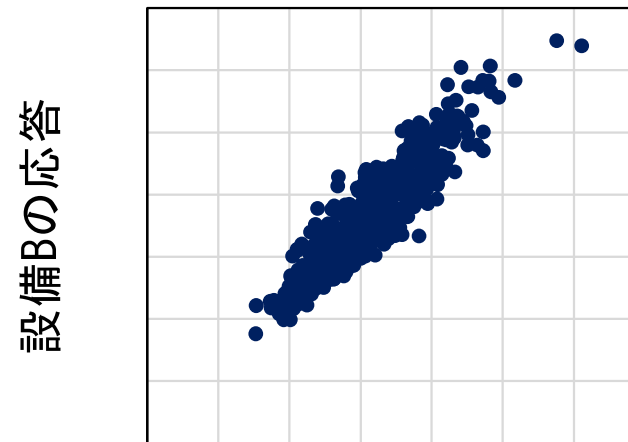


# 相関係数の設定方法(2/3)

不確かさを考慮した地震応答解析の結果を統計処理

相関係数の算出式

$$\frac{\text{設備Aの応答と設備Bの応答の共分散}}{\text{設備Aの応答の標準偏差} \times \text{設備Bの応答の標準偏差}}$$



設備Aの応答

複数回の不確かさを考慮した地震応答解析によって得られる設備Aの応答と設備Bの応答の関係



# 相関係数の設定方法(3/3)

## ◆ NUREG-1150の規則を適用

### NUREG-1150の規則

| No. | ケース                                            | 相関係数 |
|-----|------------------------------------------------|------|
| 1   | 同じフロアに設置されスペクトル周波数領域が等しい(ZPA, 5-10Hz, 10-15Hz) | 1.0  |
| 2   | 同じフロアに設置されスペクトル周波数領域が異なる                       | 0.5  |
| 3   | 同一建屋内の異なるフロアに設置されスペクトル周波数領域が同じ                 | 0.75 |
| 4   | 地面に設置されている機器については隣接建屋の同じレベルにあるとする              | —    |
| 5   | 一連の弁                                           | 1.0  |
| 6   | 以上に該当しない場合                                     | 0    |