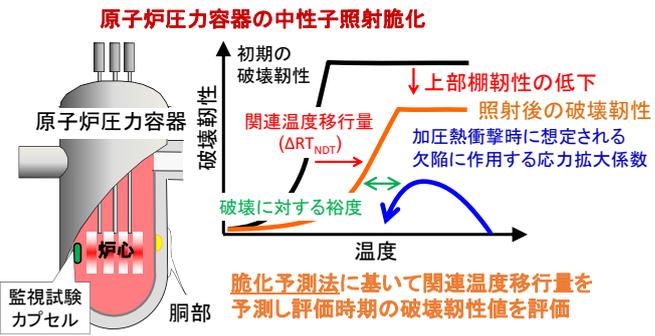


# ベイズ統計を用いた原子炉圧力容器鋼の中性子照射脆化の評価

安全研究センター 材料・構造安全研究ディビジョン 材料・水化学研究グループ

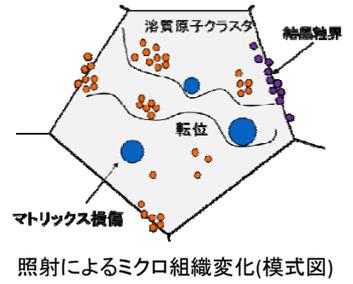
## 背景・目的

一次冷却材バウンダリ機器として最も重要で交換が困難である原子炉圧力容器(RPV)の健全性評価においては、RPVの内表面に亀裂を想定した上で、加圧熱衝撃事象(PTS)(非常用炉心冷却水の注入等による急激な冷却によりRPV内面に大きな引張応力が発生する事象)に対して容器が破壊しないことが求められる。一方、原子炉の長期供用に伴い原子炉圧力容器鋼は中性子照射による脆化が進行するため、高照射量領域にわたる照射脆化を考慮した上で、健全性を評価する必要がある。



### 既往の脆化予測

- 現象論的評価手法
    - 材料の化学成分項[CF] × 中性子照射項[FF] (米:NRC RG1.99r2, 仏:FIS/FIM, 米:E900-15等)
  - 機構論的評価手法
    - 溶質原子クラスタ[SC] + マトリックス損傷[MD] (米:EONY, 日:JEAC4201-2007等)
- 考慮する化学成分等やモデル式を事前に決定し、データに合わせて係数を最適化



### 統計解析手法(ノンパラメトリックベイズ法)の特徴

- 実測データの複雑さを学習してデータを分類(モデルを事前に決定しない)
- データの数やばらつきに基づいて、全体の確率分布を表現

本研究では、従来とは全く異なるアプローチにより原子炉圧力容器鋼の脆化予測の信頼性向上に資することのできる知見を得る。具体的には、モデル式を必要としない統計解析手法を用いて照射脆化に関わる因子を評価し、中性子照射脆化メカニズムに関する知見を得る。

## ノンパラメトリックベイズ法

### ベイズの定理

$$P(\theta|D) = \frac{P(D|\theta)P(\theta)}{P(D)}$$

$P(\theta)$ : 確率分布  
 $D$ : データ  
 $\theta$ : データを表す確率分布のパラメータ

$P(D|\theta)$ : パラメータの事後分布(答えとして求めたい確率分布)  
 $P(\theta)$ : パラメータの事前分布(主観的に与える確率分布)  
 $P(D)$ : 尤度  
 $P(D)$ : データが得られる確率(不明なため規格化定数として扱う)

$$P(\theta|D) \propto P(D|\theta)P(\theta)$$

「事後分布」は「尤度」と「事前分布」の積に比例

### 確率分布のモデル化

(正規分布の無限和: 無限混合ガウスモデル)

$$p(D|\mu, \sigma) = \sum_{k=1}^{\infty} \pi_k N_k(D|\mu_k, \sigma_k)$$

$\sum_{k=1}^{\infty} \pi_k = 1, \int N_k(D|\mu_k, \sigma_k) dD = 1$

$D$ : 実測データ,  $k$ : 正規分布の数,  $M$ : 正規分布,  $\mu$ : 平均値,  $\sigma$ : 標準偏差(多次元: 共分散行列),  $\pi$ : 混合比(重み)

モンテカルロサンプリングとベイズ推定を用い、統計的類似性にもとづいてデータを分類し、正規分布の数、各正規分布のパラメータ、混合比を算出

### 統計的類似性に基づくデータの分類

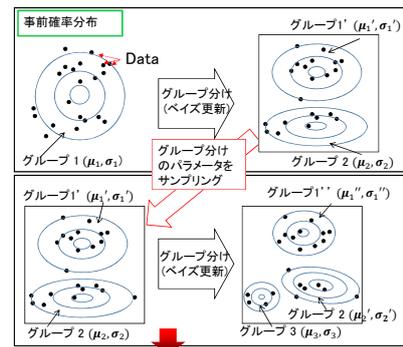
既存のグループに所属する確率

$$p(x_n|k) \propto \frac{n_k}{\alpha + n_k - 1} \quad (k = 1, \dots, K)$$

新たなグループに所属する確率

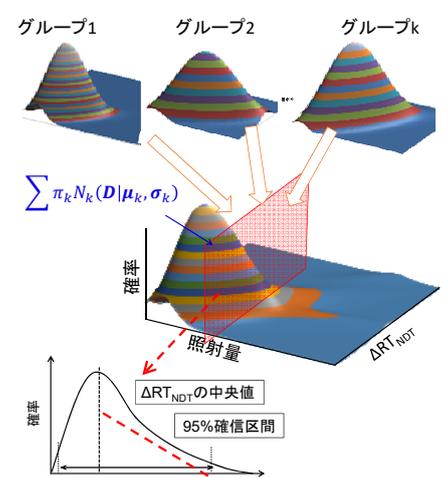
$$p(x_n|k^{new}) \propto \frac{\alpha}{\alpha + n_k - 1} \quad (k = K + 1)$$

$p(x_n|k)$ : 尤度,  $x$ : データ,  $k$ : グループID,  $n_k$ : グループkに所属するデータ数,  $\alpha$ : 集中度パラメータ



グループ分けのパラメータのサンプリングを繰り返し実施し、事後確率分布を取得

### データ全体の確率分布の模式図 (2次元: 照射量-ΔRT\_NDT)



評価したい条件に対応する関連温度移行量(ΔRT\_NDT)中央値と確信区間を推定

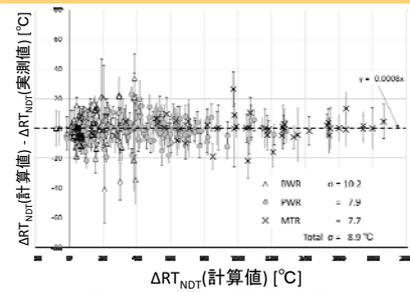
## 評価結果\*

分析対象: 国内材中性子照射データ(公開文献より収集、Flux、温度は公称値)

### データ数および入力・応変数値の範囲

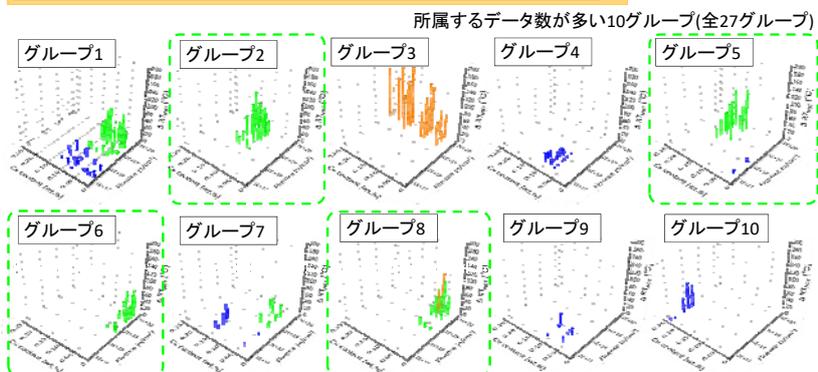
データ数	照射量 (n/cm <sup>2</sup> , E>1MeV)	照射速度 (n/cm <sup>2</sup> s, E>1MeV)	温度 (°C)	Cu (wt%)	Ni (wt%)	P (wt%)	Mn (wt%)	Si (wt%)	ART <sub>NDT</sub> (°C)	
BWR	132	4.5 × 10 <sup>16</sup> -2.2 × 10 <sup>18</sup>	1.0 × 10 <sup>9</sup> -1.0 × 10 <sup>10</sup>	276	0.01 -0.24	0.55 -0.99	0.002 -0.02	1.16 -1.72	0.15 -0.41	-11 -74
PWR	130	3.0 × 10 <sup>18</sup> -1.0 × 10 <sup>20</sup>	1.0 × 10 <sup>11</sup> -2.89	284	0.014 -0.19	0.55 -1.08	0.003 -0.014	1.06 -1.52	0.18 -0.38	0 -131
MTR	48	2.3 × 10 <sup>19</sup> -1.3 × 10 <sup>20</sup>	1.0 × 10 <sup>13</sup> -1.3 × 10 <sup>13</sup>	290	0.02 -0.25	0.57 -1.78	0.003 -0.019	1.19 -1.55	0.13 -0.32	16 -182

### 1. 関連温度移行量の計算値と実測値の関係



- ◆ BWR照射の一部を除いて、実測値と計算値が良く一致
- ◆ ΔRT<sub>NDT</sub>等、各入力変数と残差に依存性は見られない
- ◆ 実測データの密度・ばらつきに依存した確信区間を評価可能

### 2. 脆化メカニズムの評価(統計的類似性に基づくグループ分け例)



- ◆ PWR照射データ、CuおよびNi含有量の違いによって分類 (高Cu:ID2,5、低Cu:ID6,8、高Ni:ID2,6、低Ni:ID5,8) → CuとNi含有量の違いによる影響が大きい(既往知見と対応)
- ◆ 同じ鋼材のデータは同一のグループに分類され、高照射量領域特有のグループはなく、高照射量領域特有の脆化を唆する結果は見られない

## まとめ

- ◆ ベイズ統計を用いて、材料の化学成分、中性子照射条件と関連温度移行量との関係性を評価した。統計的類似性に基づくデータの分類から脆化メカニズムを評価し、既知のマイクロ組織変化とも対応する結果が得られた。なお、高照射量領域で特有の脆化メカニズムの発現を唆する結果は見られなかった。
- ◆ 本解析手法を用いて、脆化に寄与する入力変数同士の相乗効果、相互作用を詳細評価予定である。また、データの数やばらつきに応じた、脆化予測における不確かさについて検討する予定である。

\*H. Takamizawa et al., JNM 479 (2016) 533-541.