



令和4年度  
原子力規制庁技術基盤グループ-原子力機構安全研究・防災支援部門  
合同研究成果報告会

# シャルピー衝撃試験による原子炉圧力容器の 脆化評価の不確かさに関する研究

令和4年11月22日

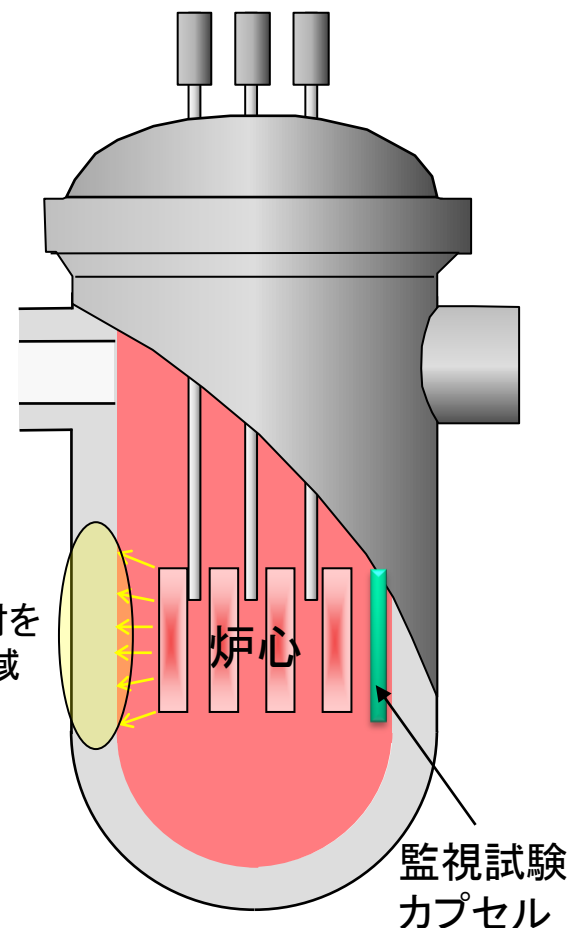
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
安全研究・防災支援部門 安全研究センター  
経年劣化研究グループ

高見澤 悠

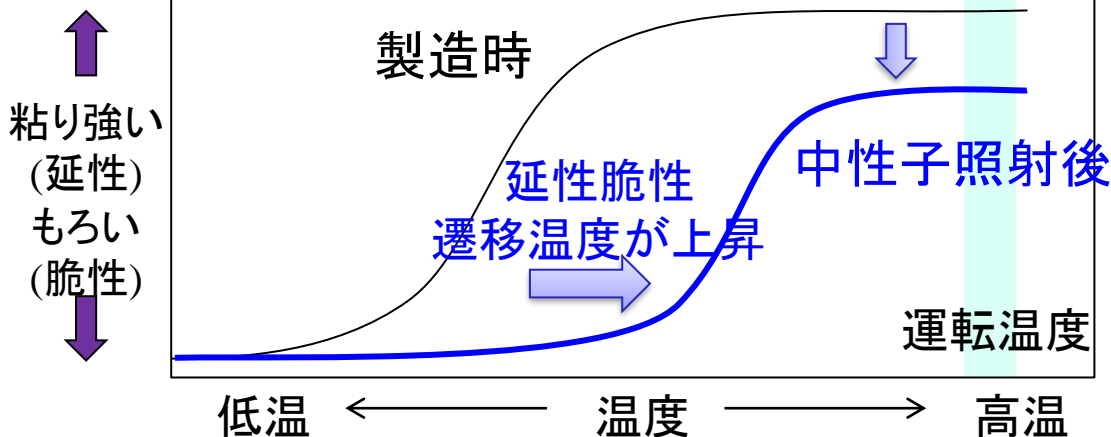
# 原子炉压力容器

軽水炉の原子炉压力容器(RPV)は、安全上最も重要な機器

- 低合金鋼(フェライト系合金)  
Mn-Mo鋼、あるいはMn-Mo-Ni鋼
- 運転温度での良好な機械的性質
- **低温脆性**
- 炉心からの**中性子照射**により、金属材料の粘り強さが低下すると共に、粘り強さが失われる温度(延性脆性遷移温度)が高くなる(**中性子照射脆化**)
- 脆化の程度は**監視試験**によって実測・評価がされている



加圧水型原子炉(PWR)の  
模式図

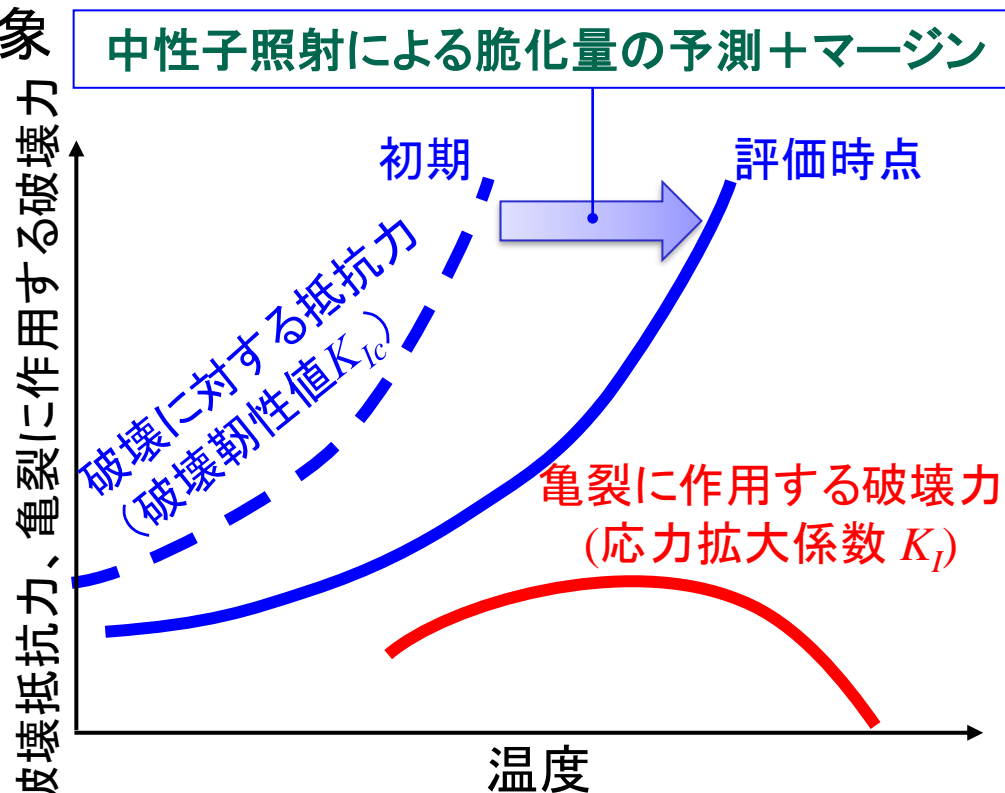
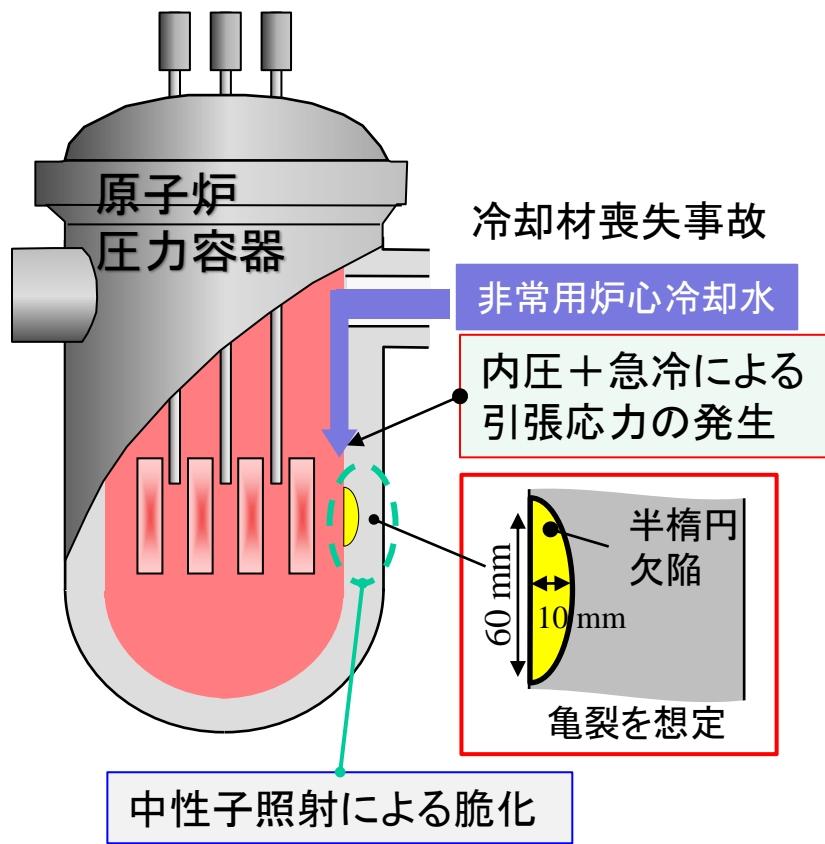


# RPVに対して最も厳しい事象における健全性評価

中性子照射脆化を考慮し、破壊力学評価により脆性破壊を防止

加圧熱衝撃事象(PWRプラント)

-脆性破壊の可能性が最も高い事象

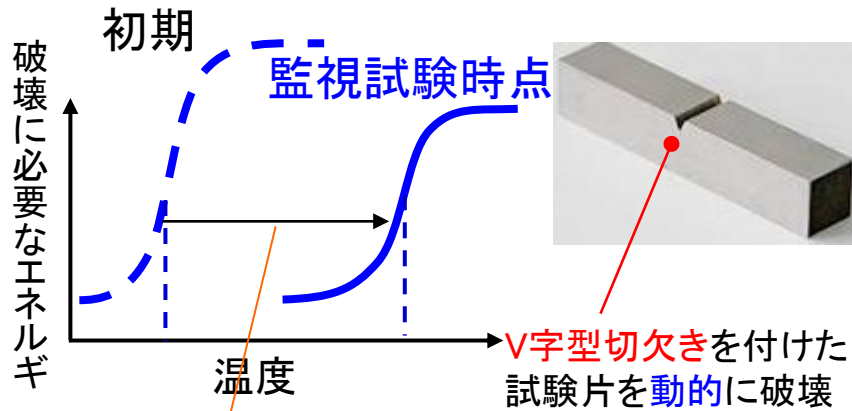


脆性破壊を防止するための条件

$$\boxed{\text{破壊靱性値}} > \boxed{\text{応力拡大係数}}$$

# 原子炉压力容器鋼の破壊靱性評価

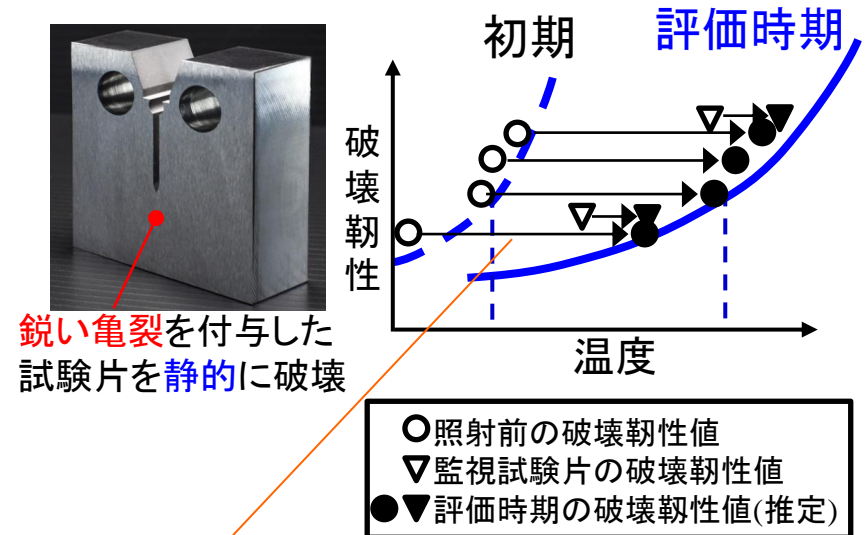
## シャルピー衝撃試験



脆化量=シフト(実測)

- ⇒
- 脆化予測法の策定
  - 個々のプラントの初期値補正

## 破壊靱性試験



脆化量=シフト(予測)

シャルピー衝撃試験と脆化予測法を用いて破壊靱性の脆化量を予測

# 課題と主な取り組み

- 課題:
- ① 脆化予測精度の継続的向上
    - ✓ 運転期間の長期化に伴う、高照射量領域での脆化予測
  - ② 評価上重要な部位(破壊靱性が低い部位)の把握
    - ✓ 監視試験の必要性判断(溶接金属、溶接熱影響部)
  - ③ 評価の不確かさを考慮した適切なマージンの設定
    - ✓ 試験数が少ない場合の健全性評価
  - ④ 照射後の破壊靱性の直接評価
    - ✓ シャルピー衝撃試験などを用いた間接的評価による不確かさの排除

## 主な取り組み

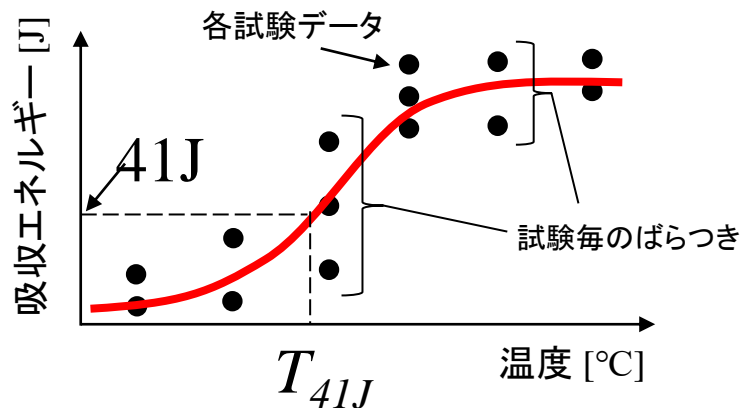
- シャルピー衝撃試験による評価の不確かさ評価 (①、②、③) ← 本発表
- 微小破壊靱性試験片の適用性確認 (②、④)
- 機械学習に基づく監視試験データの統計解析 (①、③)

## 関連する課題

# シャルピー衝撃試験による評価の不確かさ



シャルピー衝撃試験機



シャルピー衝撃試験による延性脆性遷移温度 ( $T_{41J}$ ) の評価 (模式図)

$T_{41J}$  ( $\Delta T_{41J}$ ) の不確かさ

試験片採取位置  
(材料の非均質性)

試験数(データ点数)

試験温度

本質的に避けることができない不確かさ

多数の試験を実施すれば低減できる不確かさ



監視試験で実施できる試験数は限られる

# 本研究の目的

- 試験数の限られたデータから材料の非均質性、試験数、試験温度を考慮した上でシャルピー $T_{41J}$ の不確かさを評価する手法を整備する
- 中性子照射前後のRPV鋼の $T_{41J}$ の不確かさを評価し以下の事を明らかにする
  - 日米材における $T_{41J}$ の不確かさの違い
    - ✓ 米国監視試験データの国内材評価への活用に関する確認。
  - 中性子照射が $T_{41J}$ の不確かさに及ぼす影響
    - ✓ 照射による材料非均質の増大の有無の確認

# 評価方法

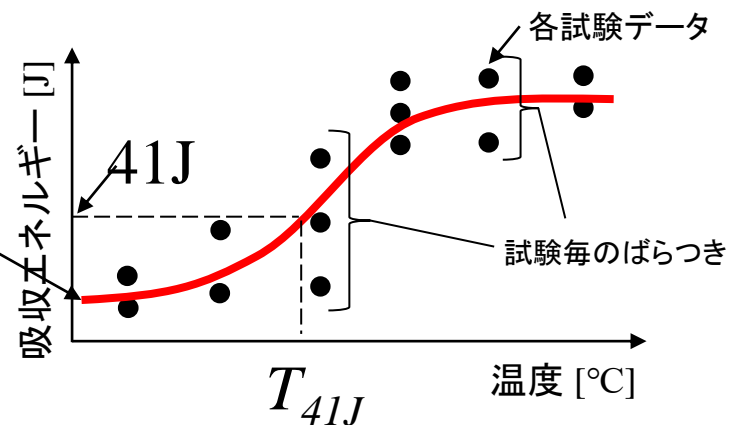
吸収エネルギーのばらつきを考慮して  
延性脆性遷移曲線の確率分布を求める

延性脆性遷移曲線の評価式

$$\text{吸収エネルギー}[J] = A + B \cdot \tanh\{(T - D)/C\}$$

$$a = A - B \text{ (下部棚)}, \quad b = A + B \text{ (上部棚)}$$

$a$  の係数の確率分布をマルコフ連鎖  
モンテカルロ(MCMC)サンプリング  
で求める



解析ツール

使用言語: R言語

ライブラリ: RJAGS (Just Another Gibbs Sampler)など



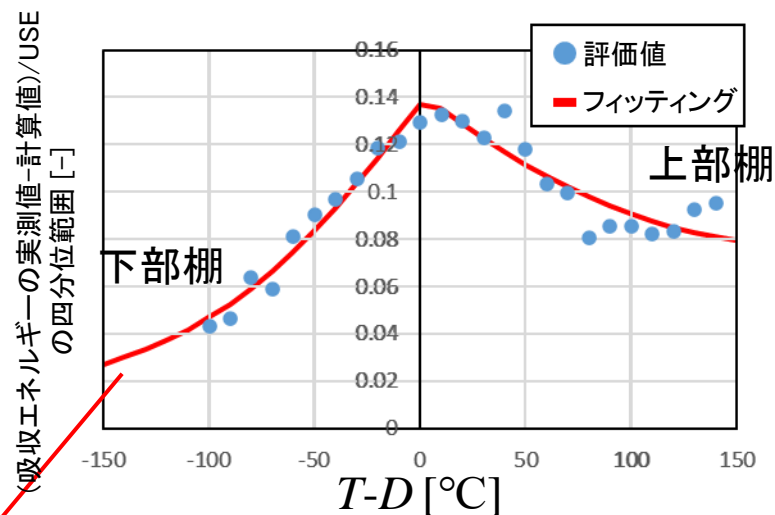
# 吸収エネルギーのばらつきの温度依存性

## 分析対象データ

	JAEA既往研究データ	国プロデータ(PLIM、PTS、WIM)	米監視試験 (REAP)
未照射	14種(388点)	24種(418点)	453種(8490点)
照射	4種(44点)	51種(652点)	1353種(15216点)

### 温度依存性モデル化のためのデータ処理

- ① それぞれのデータを双曲線関数でフィッティングして実測データとの差を求める
- ② 双曲線関数の変曲点の温度( $D$ )で試験温度を規格化
- ③ 上部棚吸収エネルギー(USE)で吸収エネルギーの残差を規格化
- ④ 吸収エネルギーの残差(規格化後)と試験温度(規格化後)の関係を評価(右図)



規格化したシャルピー衝撃吸収エネルギーのばらつきの試験温度依存性

吸収エネルギーのばらつき ( $SD$ )

$$SD \equiv stdev - 0.7 * stdev * |\tanh\{(T_k - D)/C\}| + 0.2 * stdev * \tanh\{(T_k - D)/C\}$$

# 延性脆性遷移曲線の確率分布の算出

## 係数のサンプリング条件

$$a \sim UNIF(0, 40)$$

$$b \sim UNIF(42, 300)$$

$$C \sim UNIF(0, 400)$$

$$D \sim UNIF(-200, 200)$$

$$J_k \sim NORM(\mu_k, 1/SD^2)$$

→ 個々の実測値の不確かさを表す項

*UNIF* : 一様分布(サンプリングの下限、上限)

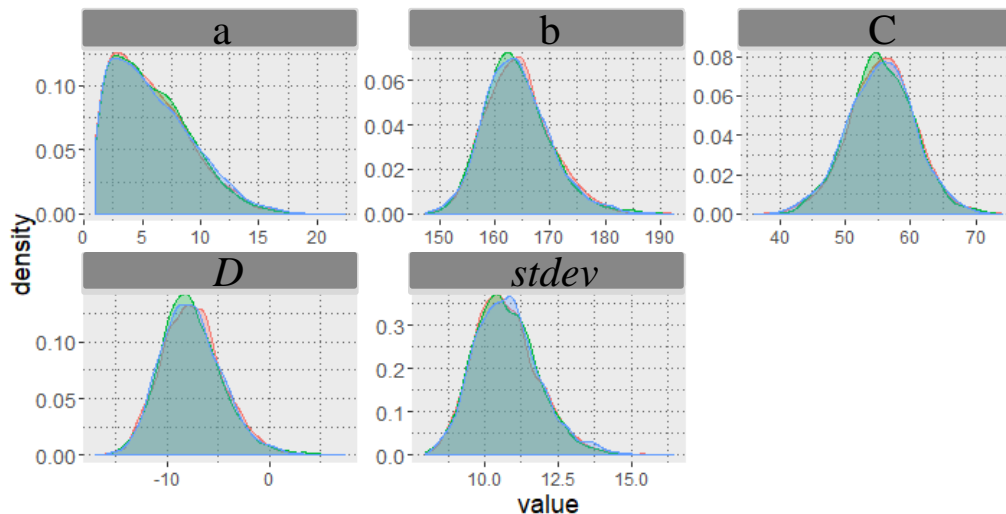
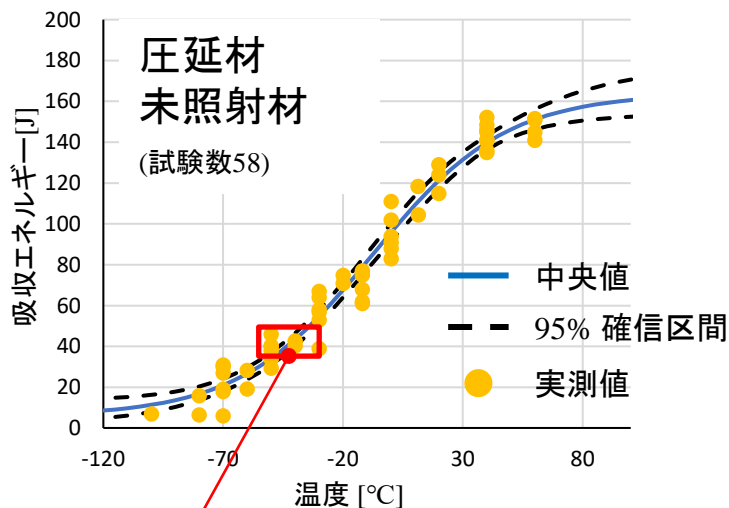
*NORM* : 正規分布(サンプリングの平均値と分散)

$J_k$  : サンプリングされた係数セットを用いたときの  $k$  番目のデータの吸収エネルギー

$\mu_k$  : サンプリングされた係数セットを用いたときの  $k$  番目のデータの吸収エネルギーの中央値

$SD$  : 吸収エネルギーの不確かさ

↳ 前述の温度依存性を考慮

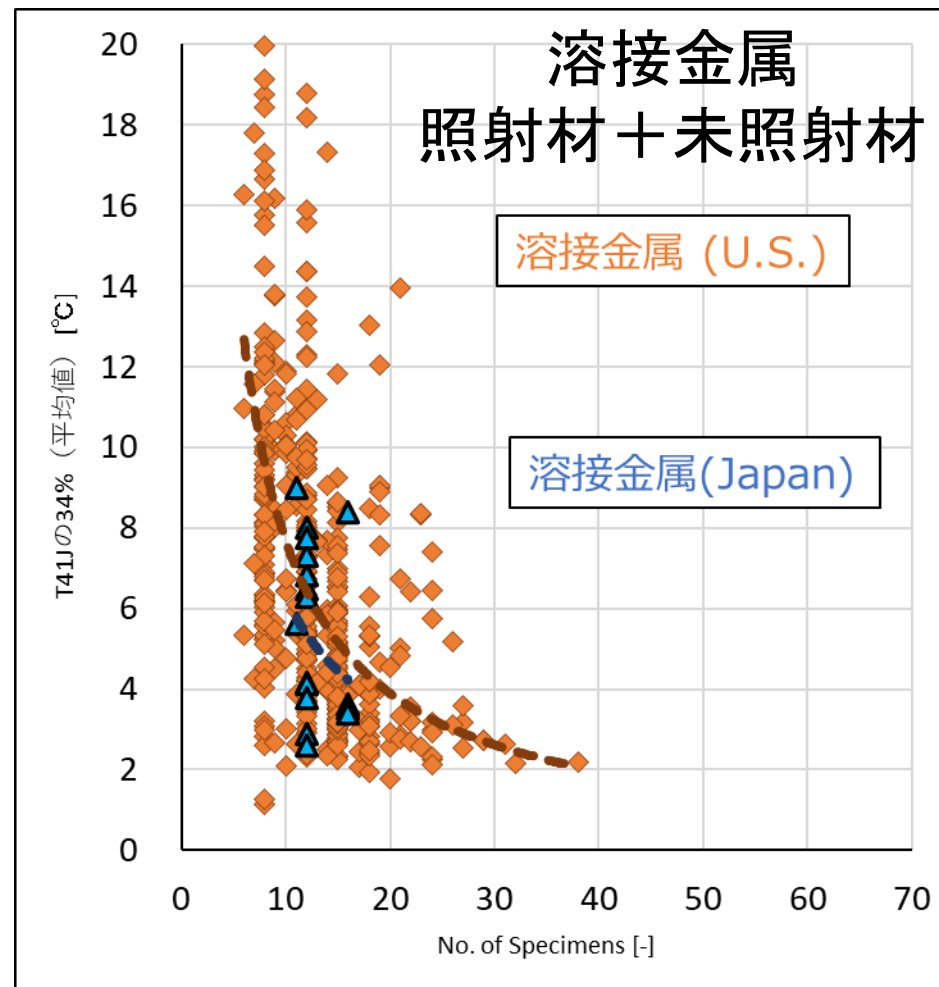
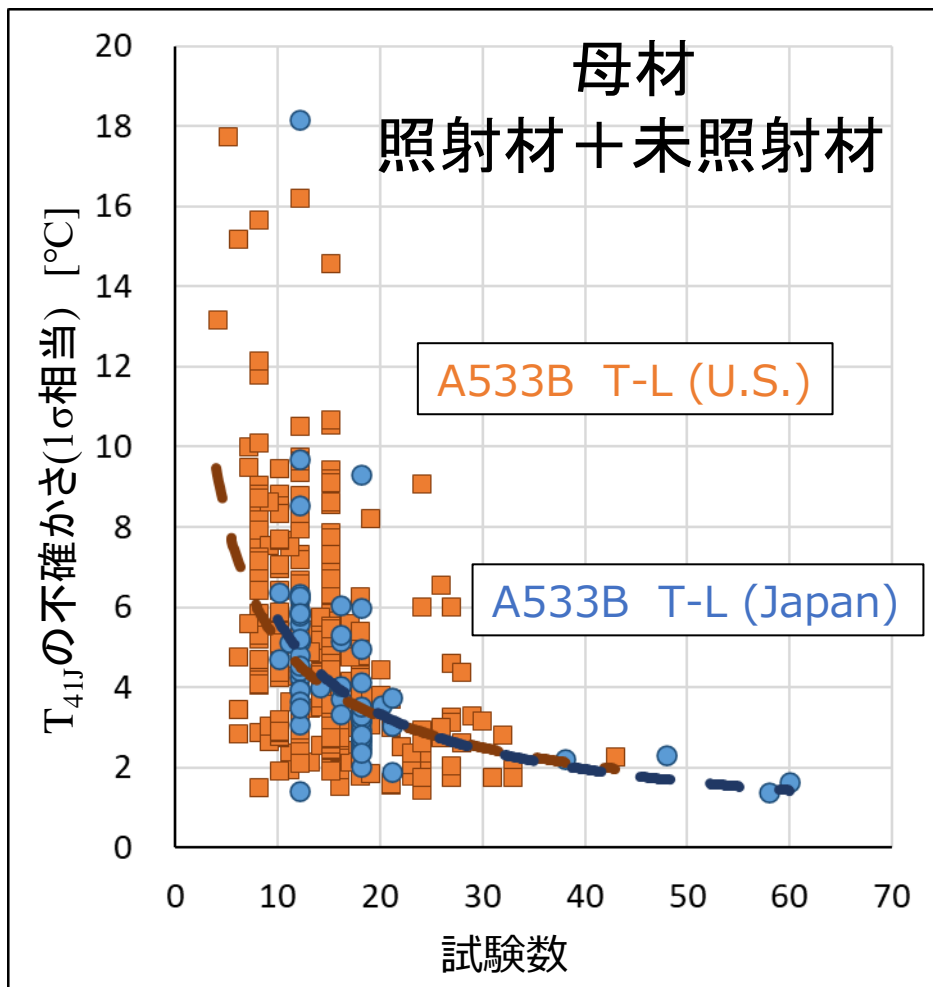


延性脆性遷移曲線の確率分布の算出例

双曲線関数の係数サンプリング例

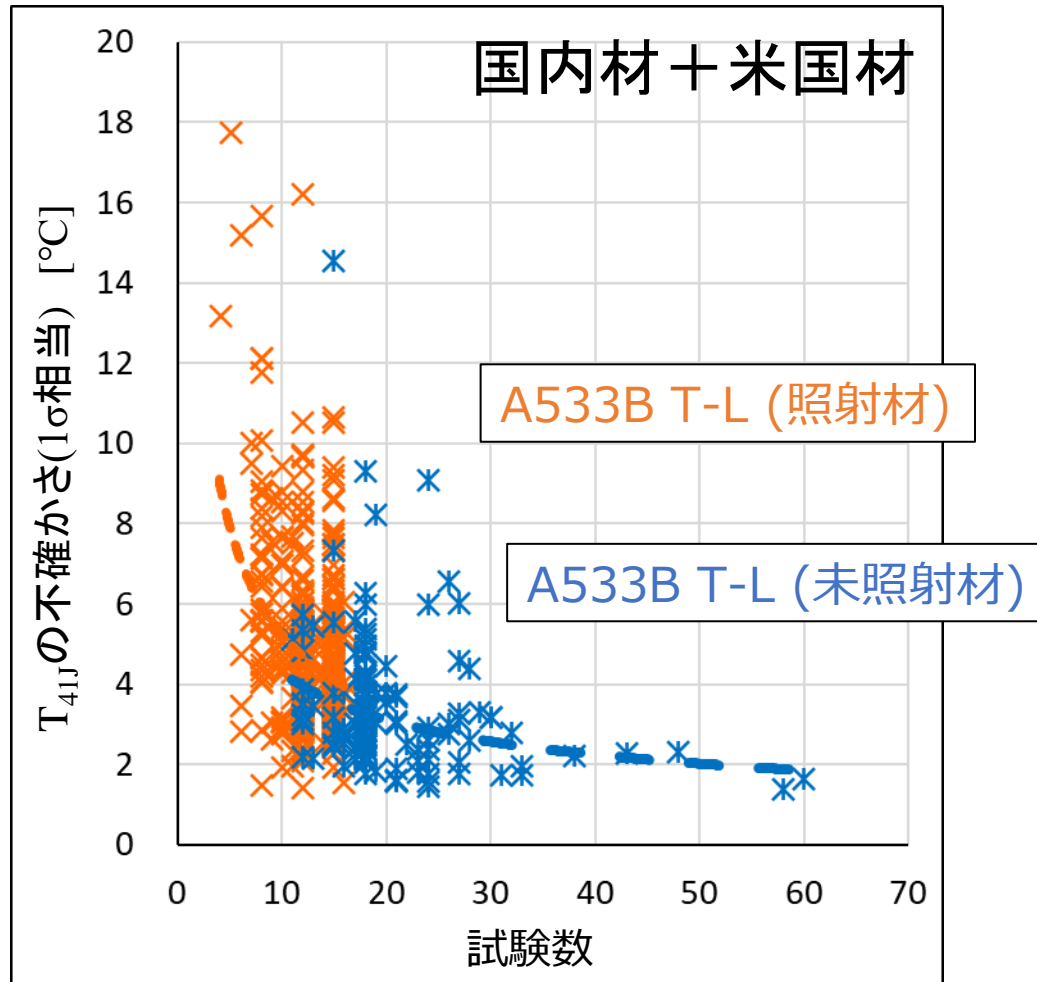
$T_{41J}$  の確率分布を用いて不確かさを定量評価

# 米国材と国内材の違い



- 米国材と国内材での不確かさの傾向は違いは見られない
- 溶接金属でも同様の傾向

# 中性子照射の影響(母材)



- 中性子照射によってばらつきが増大することは無かった。

# まとめ

- シャルピー吸収エネルギーの不確かさの温度依存性をモデル化
- 実データに基づいてシャルピー $T_{41J}$ の不確かさを評価する手法を整備

シャルピー $T_{41J}$ のばらつきと試験片数との関係について

- 米国材と国内材の違い
  - 中性子照射の有無
- } 影響が小さい(ない)

➡ 米国の多量のシャルピー衝撃試験のデータが国内材のシャルピー $T_{41J}$ の不確かさ評価に活用できると期待できる。

## $T_{41J}, \Delta T_{41J}$ の不確かさ評価手法の活用先

- 脆化予測法の高度化  
(脆化量の不確かさ考慮した係数フィッティング)
- 材料毎の脆化量の有意差の判断
- 健全性評価のマージンの設定根拠  
(試験数を考慮したマージンの設定)