



Japan Atomic Energy Agency

原子炉圧力容器の構造健全性評価に関する研究 —照射脆化メカニズムから確率論的破壊力学評価まで—

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
高見澤 悠

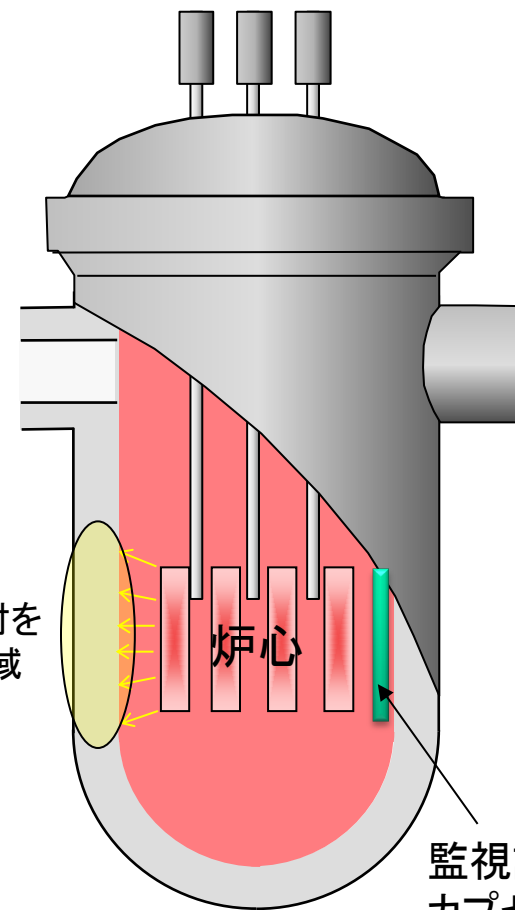
令和元年度 安全研究センター報告会
令和元年11月26日
富士ソフト アキバプラザ

原子炉压力容器

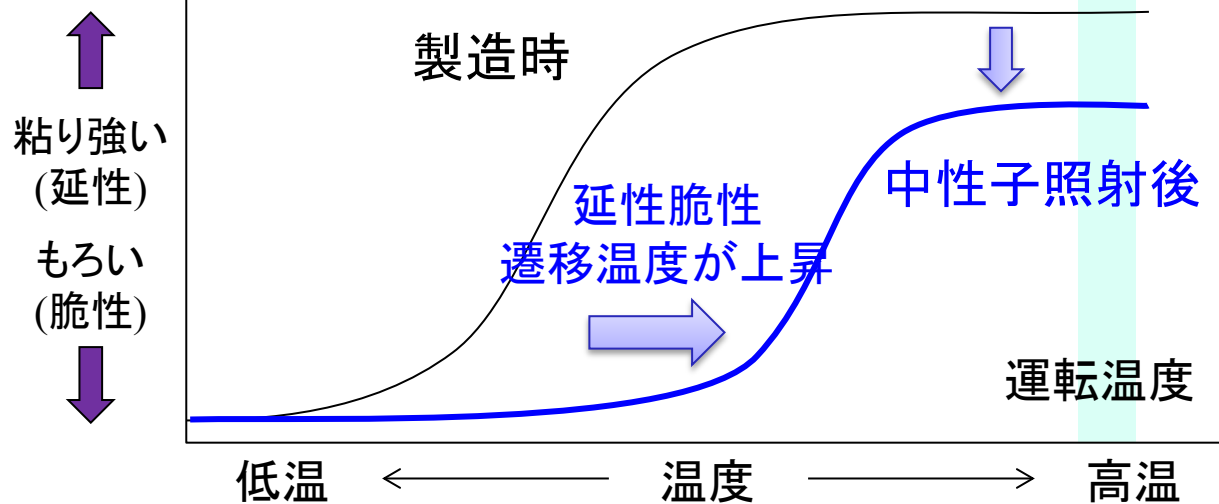
軽水炉の原子炉压力容器(RPV)は、安全上最も重要な機器

- 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、脆性破壊する温度が上昇する(中性子照射脆化)



加圧水型原子炉(PWR)の
模式図

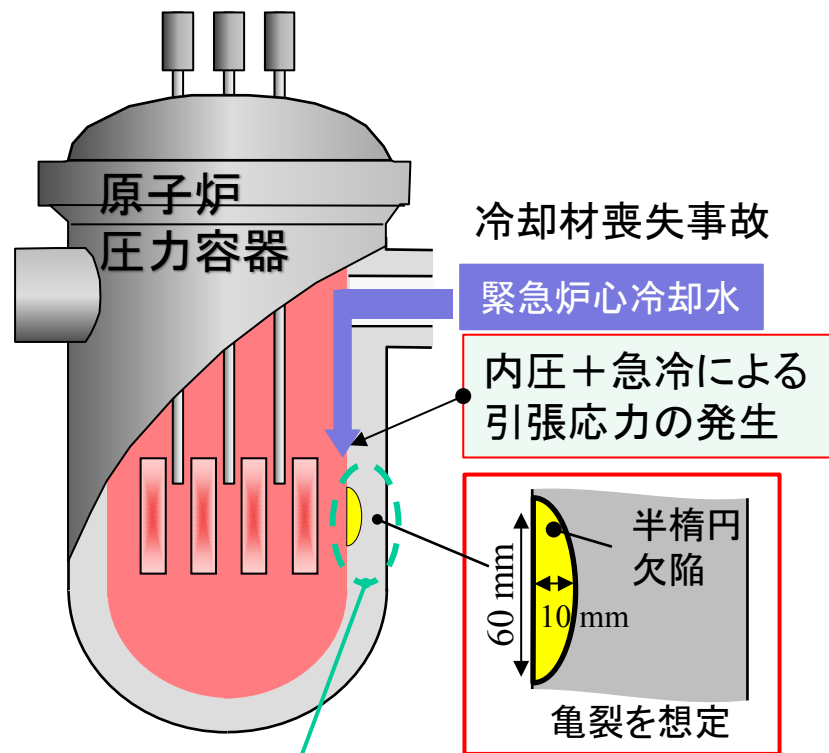


RPVの健全性評価

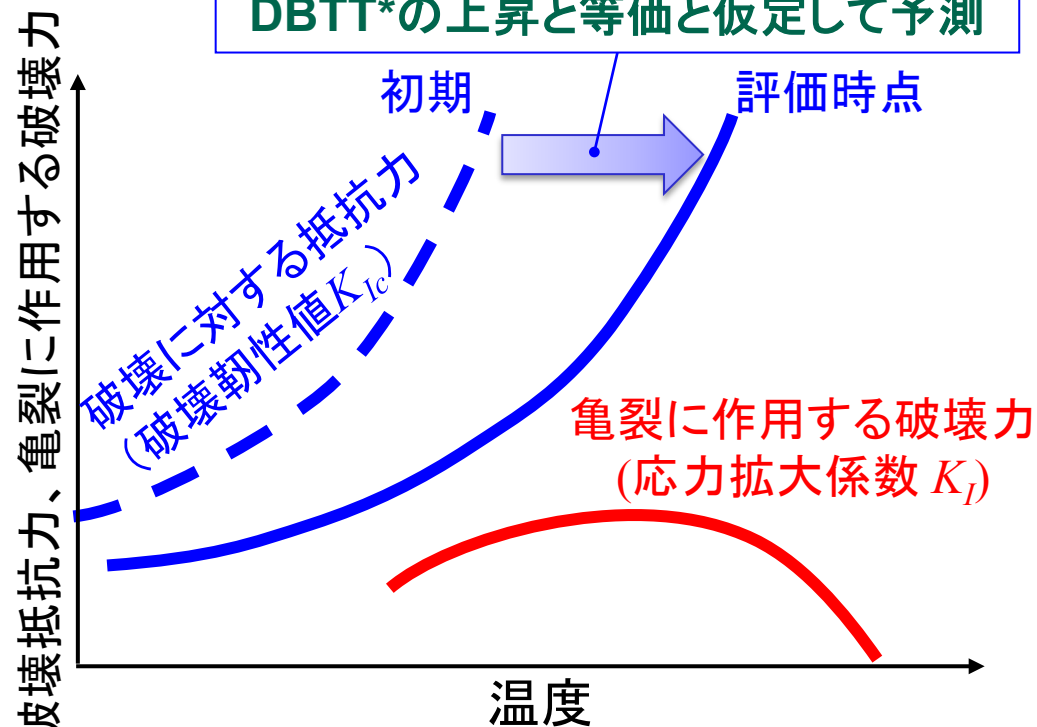
中性子照射脆化を考慮し、破壊力学評価により脆性破壊を防止

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

*DBTT: 監視試験(シャルピー衝撃試験)で
求められる延性脆性遷移温度



中性子照射による脆化量(ΔRT_{NDT})を
DBTT*の上昇と等価と仮定して予測



脆性破壊を防止するための条件

破壊靱性値 > 応力拡大係数

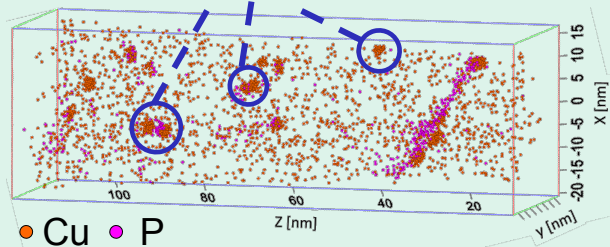
健全性評価に関する取組み

脆化予測から構造健全性まで総合的に評価

← $10^{-9} \sim 10^{-6} \text{ m}$ $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ m}$ $10^{-2} \sim \text{m}$ →

脆化予測

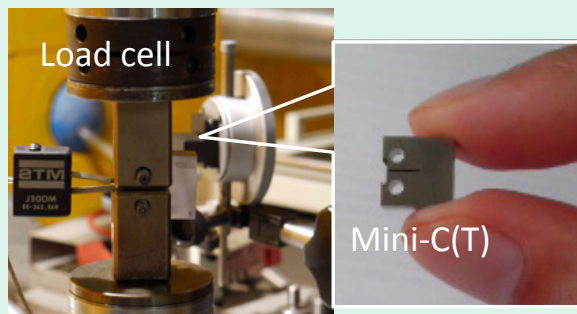
溶質原子クラスター



中性子照射による溶質原子クラスターの形成

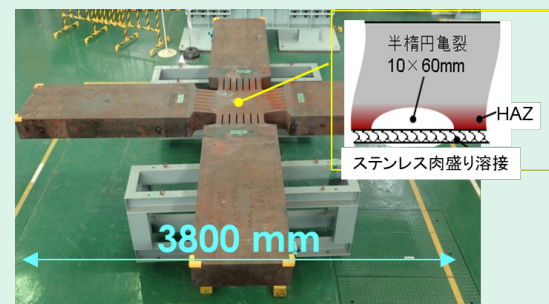
微細組織分析

破壊靱性評価

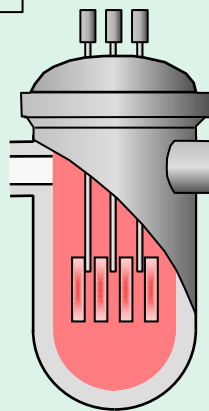


機械特性試験

破壊力学評価



実機規模板厚材の
脆性破壊試験



健全性評価に影響する代表的な不確かさ

- 予測精度
- 破壊靱性のばらつき
- 試験片寸法等の違い
- 想定条件と現実との違い



不確かさを低減し、評価手法を高精度化
不確かさを適切に捉えた確率論に基づく健全性評価手法を構築

-
1. 脆化予測
 2. 破壊靱性評価
 3. 破壊力学評価

国内の脆化予測法

原子炉構造材の監視試験方法 (JEAC4201-2007[2013年追補版])

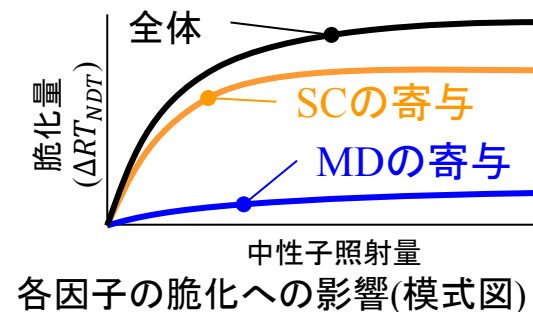
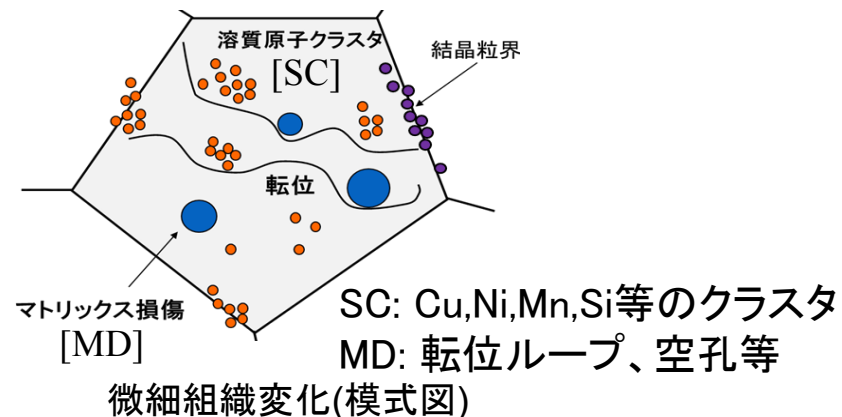
- 中性子照射による材料の微細組織変化と脆化量の関係を予測
 - 溶質原子クラスタ(SC)の形成
 - マトリックス損傷(MD)の形成

$$\Delta RT_{NDT} = \sqrt{(\Delta T_{SC})^2 + (\Delta T_{MD})^2}$$

微細組織に影響するパラメータ

中性子照射量、照射速度、照射温度

Cu含有量、Ni含有量



継続的に検討すべき項目

- 従来考慮されていない脆化因子の高照射量領域における顕在化の有無
- 予測精度の向上のために考慮すべき因子の検討
- 監視試験のばらつき等の不確かさを考慮した評価の保守性の確認

脆化予測に関する安全研究センターの取組み

これまでの取組み

- 材料試験炉を活用した照射材の微細組織分析、材料特性試験
- 文献等で公開されている材料劣化データに対する機械学習とベイズ統計に基づく解析

規制庁の動向

- 脆化予測法に関する規格の次の技術評価に向けて、妥当性確認等に係る技術的知見を整備することを決定*

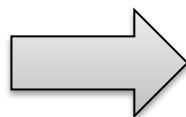
*平成27年12月16日

<http://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11235834/www.nsr.go.jp/data/000133414.pdf>

原子力規制庁からの受託事業「軽水炉照射材料健全性評価研究」

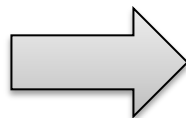
電気事業者から入手

監視試験データ



機械学習を用いた
統計解析

監視試験片



微細組織分析

機械学習を用いた監視試験データの統計解析

目的 既存知見に捉われることなく、純粹に統計的に照射脆化を評価

手法 ノンパラメトリックベイズ (BNP: Bayesian non-parametric)法

- 特徴
- データの複雑さを自動的に学習してデータの確率分布を求める
 - 脆化因子の影響度を評価可能
 - 確信区間を定量的に推定可能

評価対象 国内監視試験データ

入力パラメータ及びデータの範囲

| | データ数 | 照射量 (n/cm ²) | 照射速度 (n/cm ² /s) | Cu (wt.%) | Ni (wt.%) | P (wt.%) | Si (wt.%) | Mn (wt.%) |
|-----|------|---|---|---------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|
| PWR | 206 | 3.0 × 10 ¹⁸ ~1.0 × 10 ²⁰ | 5.8 × 10 ¹⁰ ~1.9 × 10 ¹¹ | 0.014 ~0.2 | 0.18 ~1.08 | 0.003 ~0.014 | 0.14 ~0.38 | 1.06 ~1.52 |

入力パラメータ(脆化因子)の組合せ

照射量は必ず入力変数とする

照射量以外は入力する/しないを選択

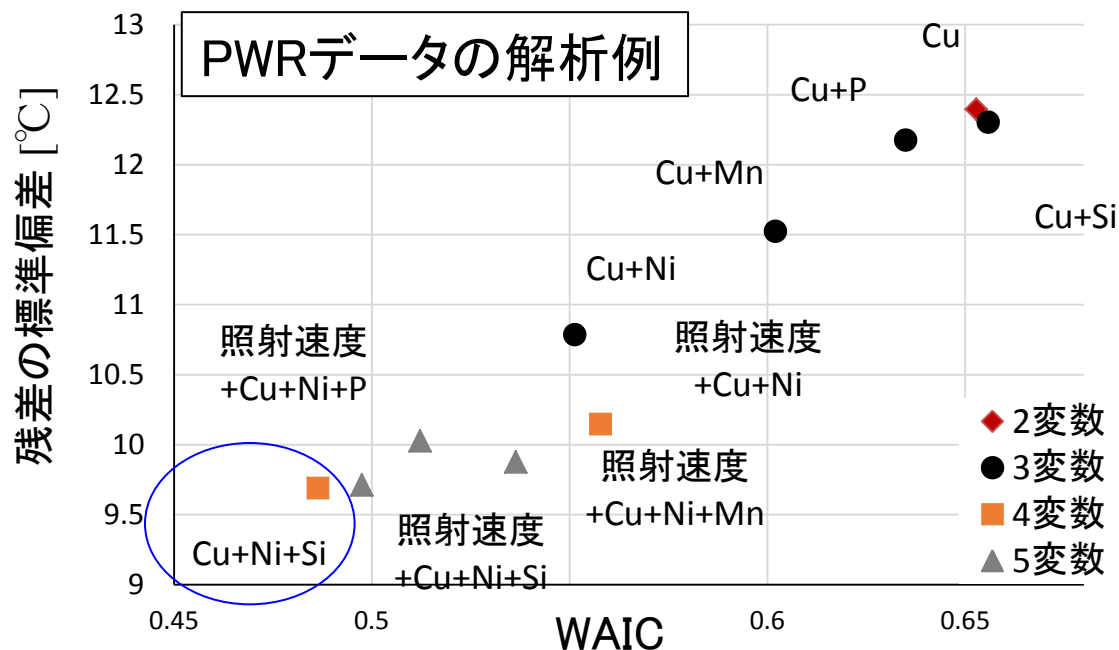
照射量、照射速度はべき係数を選択

} → 約3000通りの組合せで解析を実施

国内監視試験データの解析

評価における考え方

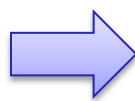
- 解析の信頼性を担保する (Gelman-rubin統計量)
- 実測データと未知の周辺データの予測性を考慮して影響度を評価可能な統計指標を用いる (WAIC: Widely Applicable Information Criterion)



WAICと標準偏差の関係 (照射量 + 他の入力パラメータ)

脆化因子の評価結果

照射量、Cu、Ni、Si

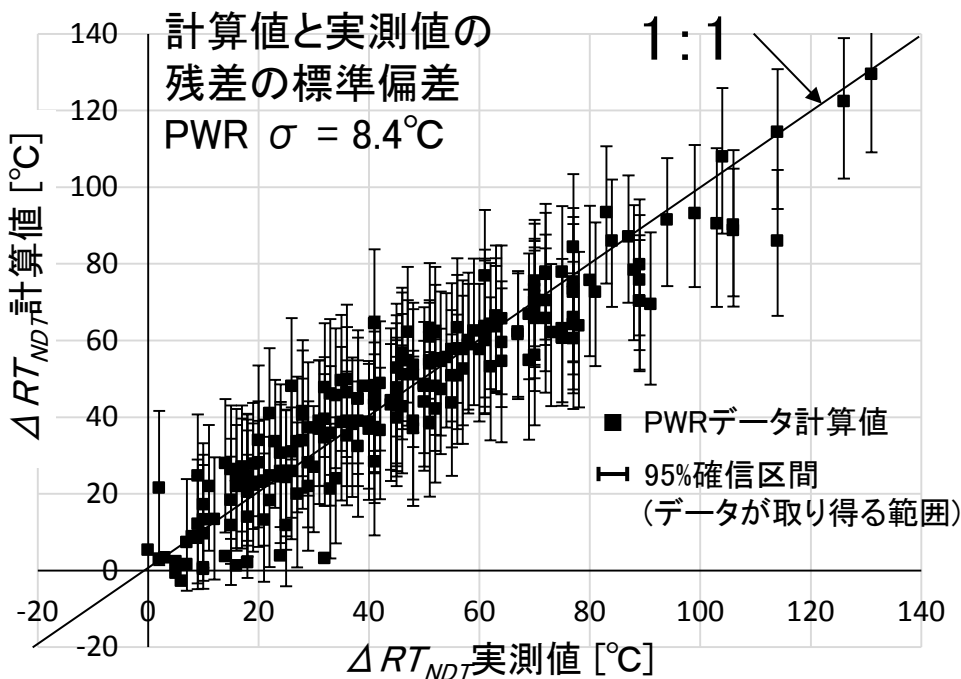


国内の予測法で考慮されている因子に加えて
Siが影響することを示唆

BNP法を用いた脆化量(ΔRT_{NDT})の予測

入力パラメータ (脆化因子)

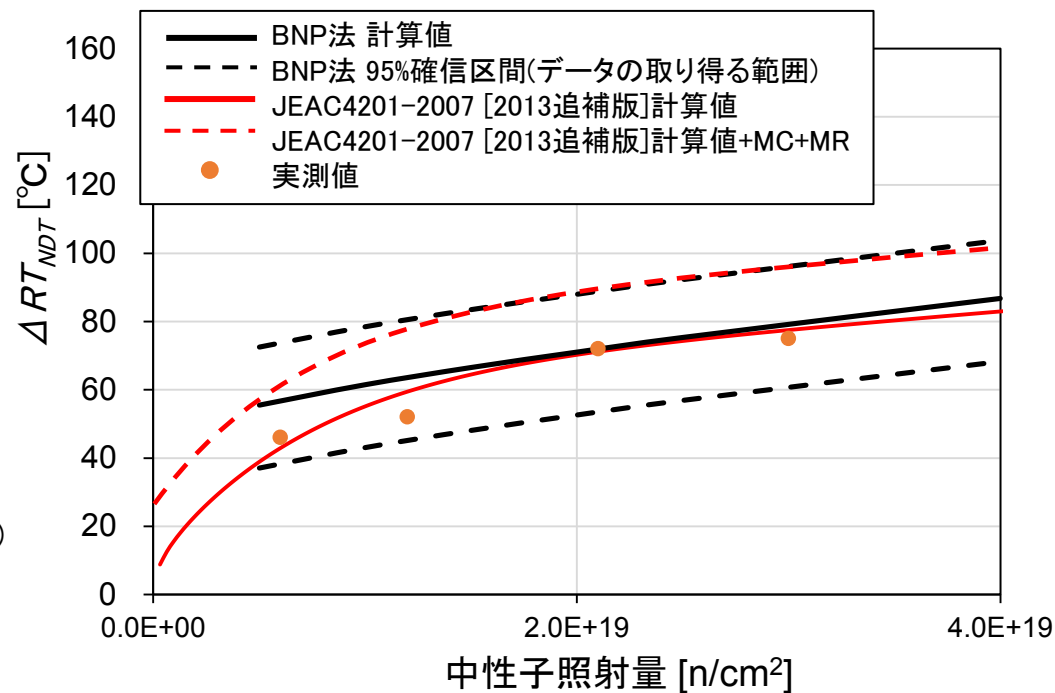
照射量、Cu、Ni、Si



脆化量の計算値と実測値の関係

PWRプラントの評価例

Cu: 0.16 wt.%, Ni: 0.59 wt.% Si: 0.20 wt.%



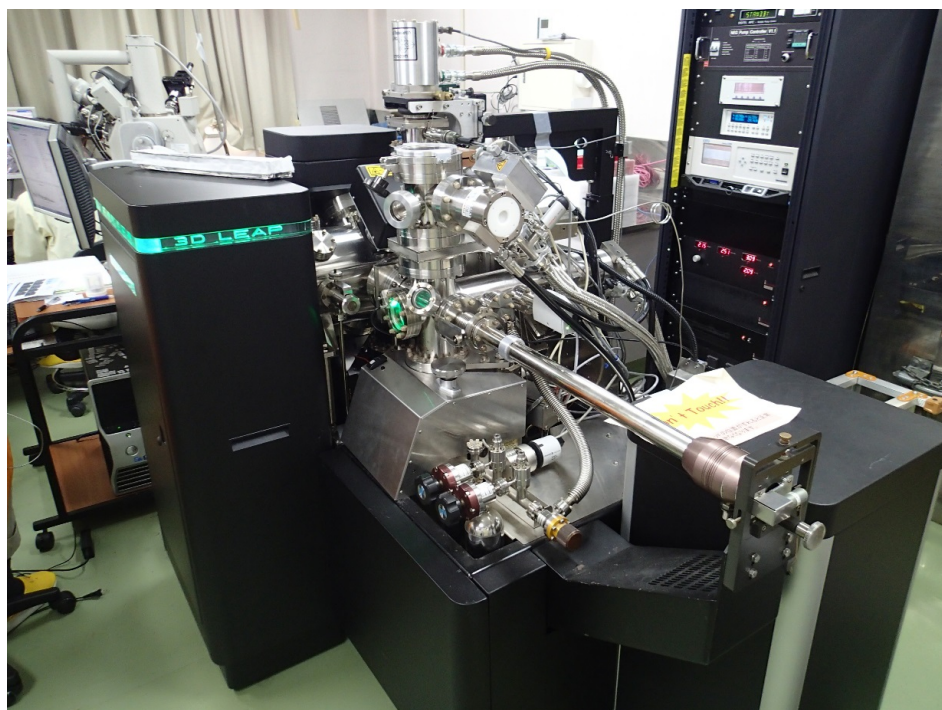
脆化量の照射量依存性

予測精度が現行の予測法と同等であることを確認するとともに
統計的に計算値と確信区間を評価できる手法を整備

微細組織分析

従来、脆化への影響が大きいことが知られている**Cu含有量**及び統計解析の結果、影響が示唆された**Si含有量**に着目して分析

三次元アトムプローブ分析



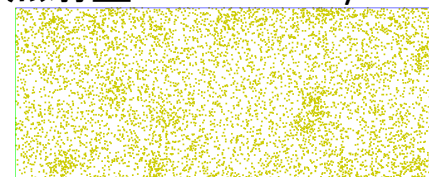
三次元アトムプローブ装置の外観
(東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センター)

測定例

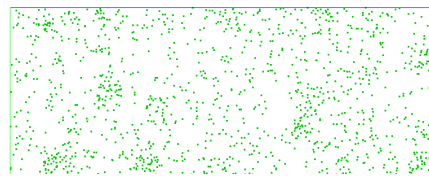
高Cu含有量: 0.13 wt%

照射量: $4.7 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$

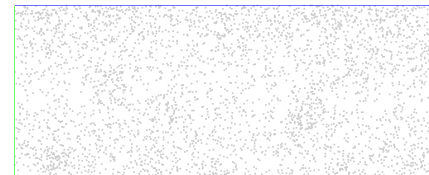
Mn



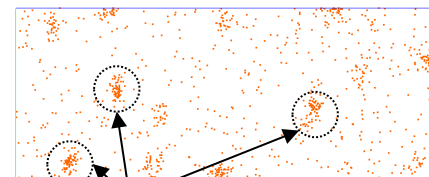
Ni



Si



Cu



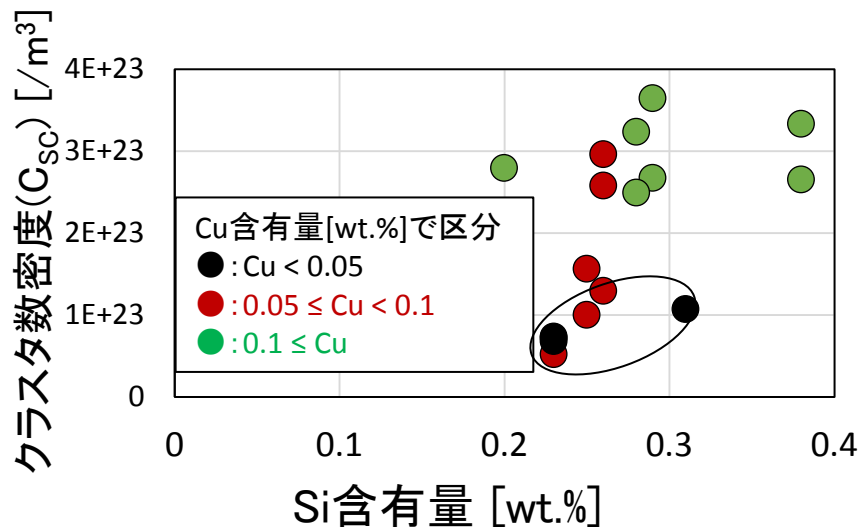
Cu富裕クラスタ

$20 \times 50 \times 20 \text{ nm}^3$

三次元アトムマップ

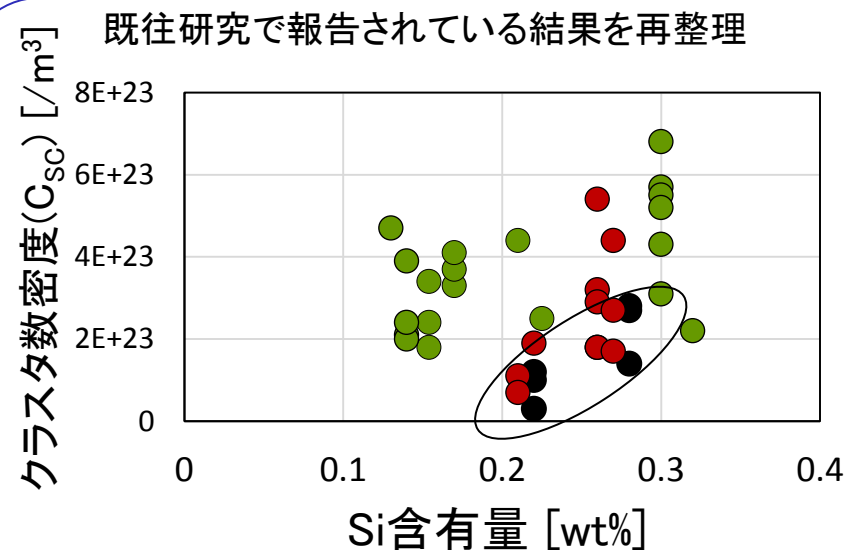
クラスタ数密度とSi含有量の関係

PWR監視試験データ



上記の図は原子力規制庁からの受託事業「軽水炉照射材料健全性評価研究」の成果である。

試験炉照射データ

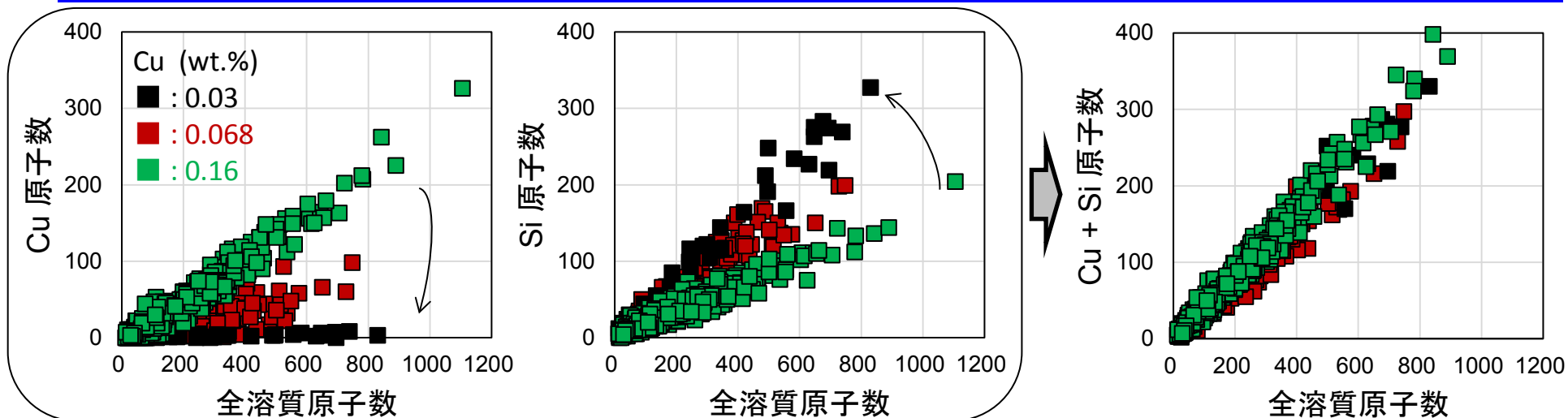


平成19年-平成21年 高照射量領域の照射脆化予測に関する報告書
 独立行政法人 原子力安全基盤機構

- 高Cu材では数密度とSi含有量の相関は明瞭でない
- 低Cu材ではSi含有量が高いほど数密度が高い傾向

低Cu材でSiがクラスタの形成に影響

クラスタ中に含まれる各溶質原子数



- Cu含有量が低くなるにしたがって、クラスタ中のCu原子数が減少しSi原子数が増加する。Cu + Si原子数はCu含有量に依らず一定

クラスタ中におけるCuとSiの働きが似ていることを示唆
低Cu材でSiがクラスタの形成に影響

上記の図は原子力規制庁からの受託事業「軽水炉照射材料健全性評価研究」の成果である。

成果の反映

- Si含有量の影響に関しては、国内脆化予測法(JEAC4201)の次期改定案において新たに取り込むことが検討されている
- JEAC4201の改定に対する国の技術評価への活用が期待される

-
1. 脆化予測
 2. **破壊靱性評価**
 3. 破壊力学評価

破壊靱性評価

照射後の破壊靱性評価における課題

- 監視試験の破壊靱性試験片は数が限られる
- 脆化予測法を用いて間接的に評価

マスターカーブ法

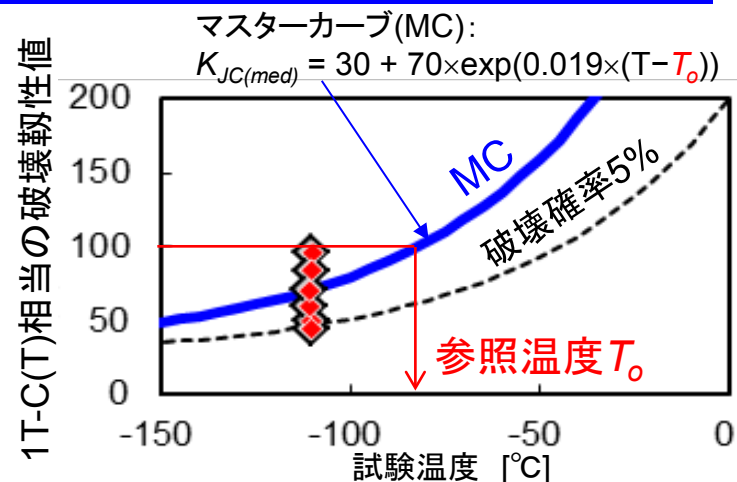
- 参照温度 T_0 を唯一の指標として破壊靱性のばらつきと温度依存性を評価可能

微小試験片 (Mini-C(T)) の適用

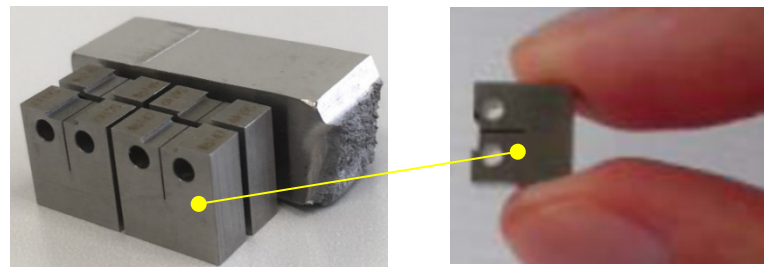
- 試験済シャルピー試験片から採取可能
- 局所領域を評価可能

適用性確認のための取組み

- 力学的影響確認のための有限要素解析
- 靱性レベル及び寸法の異なる材料を用いた破壊靱性試験
- 国内外12の機関によるラウンドロビン試験



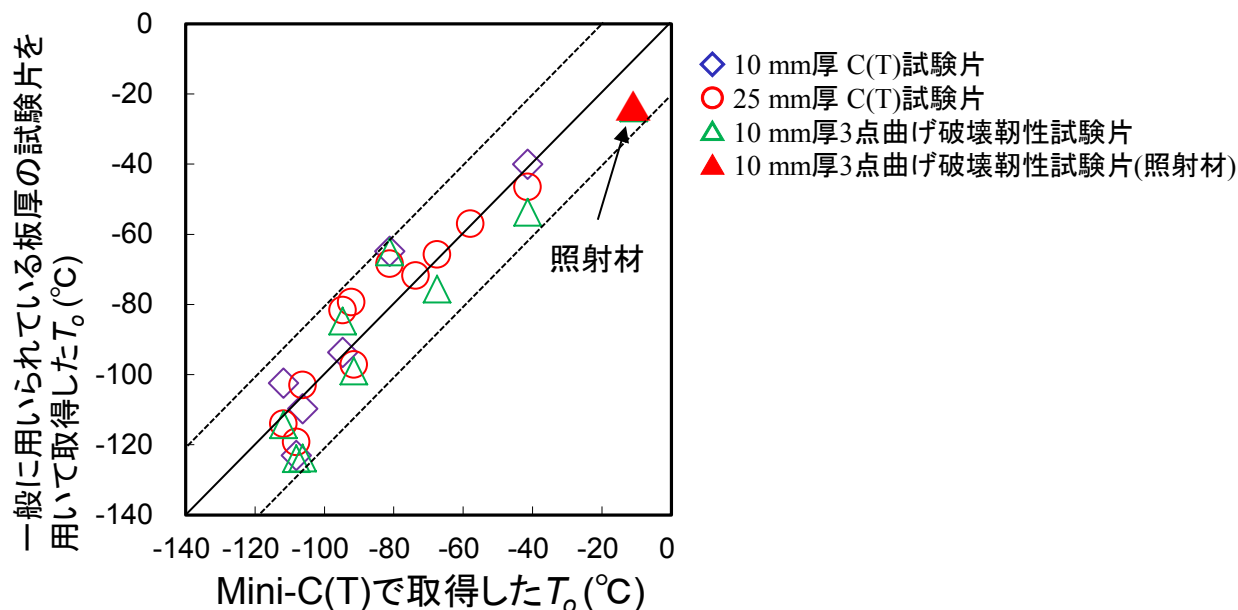
マスターカーブ法による破壊靱性遷移曲線評価例



試験済みシャルピー試験片と微小試験片

シャルピー試験片の残材から採取した破壊靱性試験

参照温度 T_0 の評価



- 照射材を含む広い靱性レベルの範囲で T_0 を評価
- Mini-C(T)と他の試験片の T_0 は概ね1:1の相関

上記の図は原子力規制庁からの受託事業「軽水炉照射材料健全性評価研究」の成果である。

成果の反映

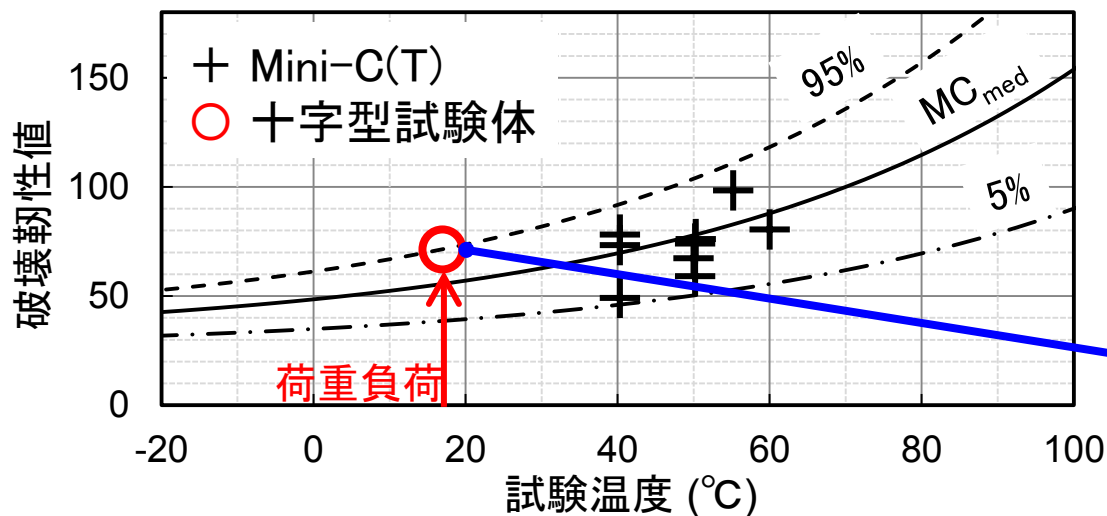
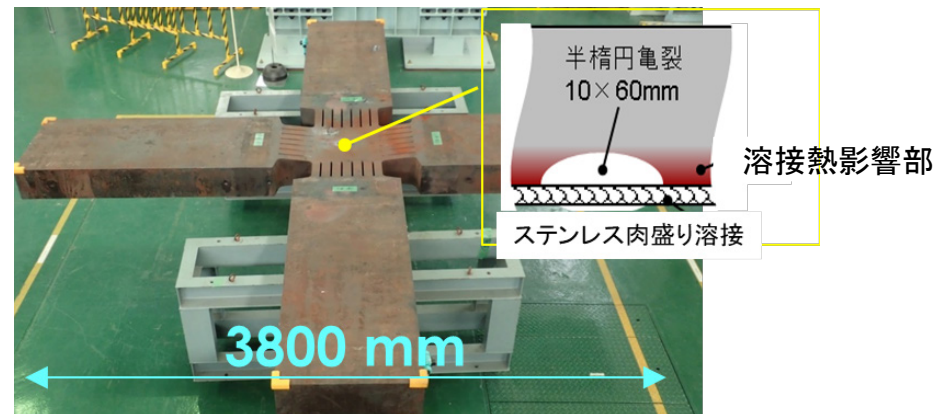
- フェライト鋼の破壊靱性試験参照温度 T_0 決定のため試験方法(JEAC4216-2011)の改定における技術根拠として引用
- 原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法(JEAC4206-2016)及びJEAC4216-2015に対する国の技術評価へ活用

-
1. 脆化予測
 2. 破壊靱性評価
 3. **破壊力学評価**

実機板厚規模の脆性破壊試験

実機板厚規模の鋼材で総合試験を実施

| | |
|------------|----------------------|
| | 実機板厚規模 十字試験体 |
| 板厚 | 150 mm |
| 亀裂形状・深さ | 半楕円(深さ10 mm、長さ60 mm) |
| 応力負荷 | 2軸 |
| 熱応力・温度勾配 | 付与可能 |
| ステンレス肉盛り溶接 | あり |



十字試験体の破壊時の応力拡大係数とC(T)試験片で
取得した破壊靱性マスターカーブの関係

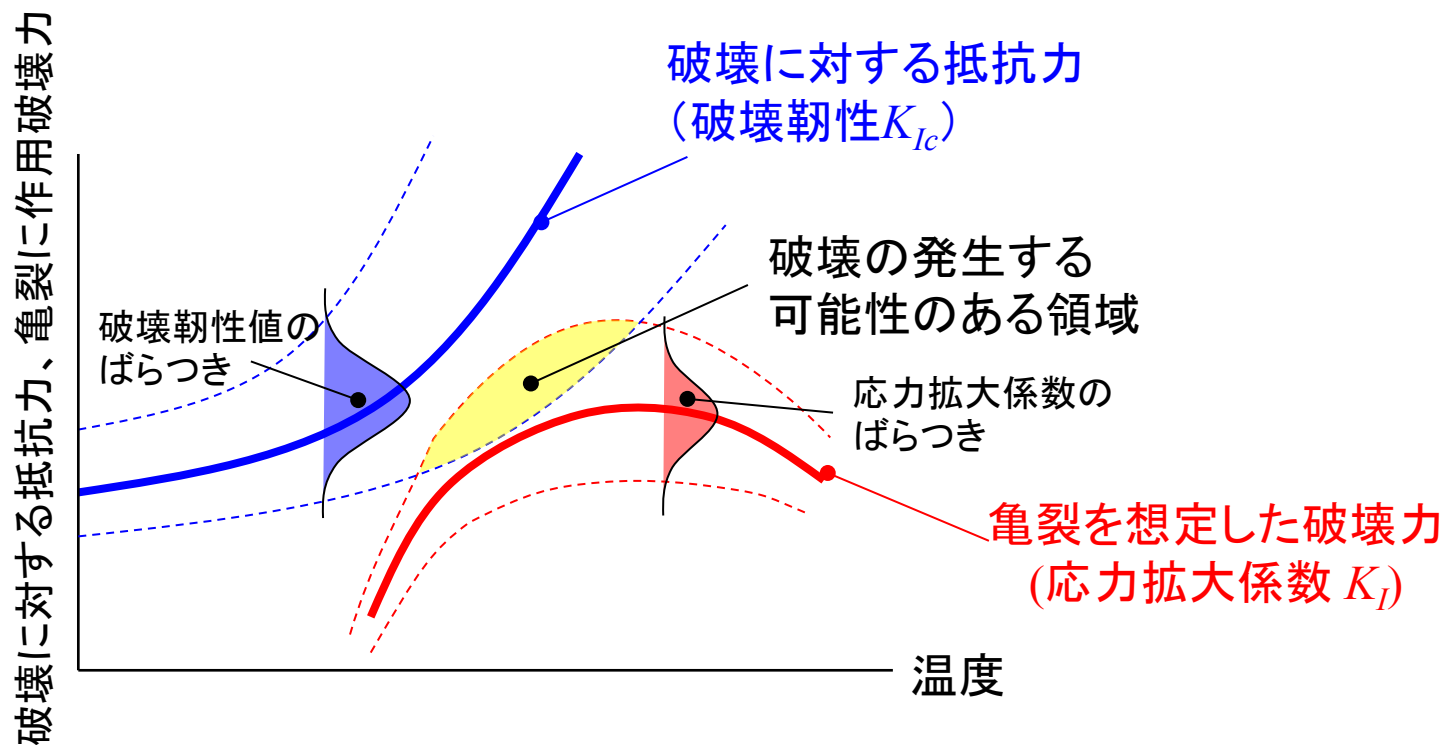


マスターカーブ中央値より
高い値で脆性破壊

急冷設備を用いた
熱衝撃試験を実施中

確率論的破壊力学評価(PFM)

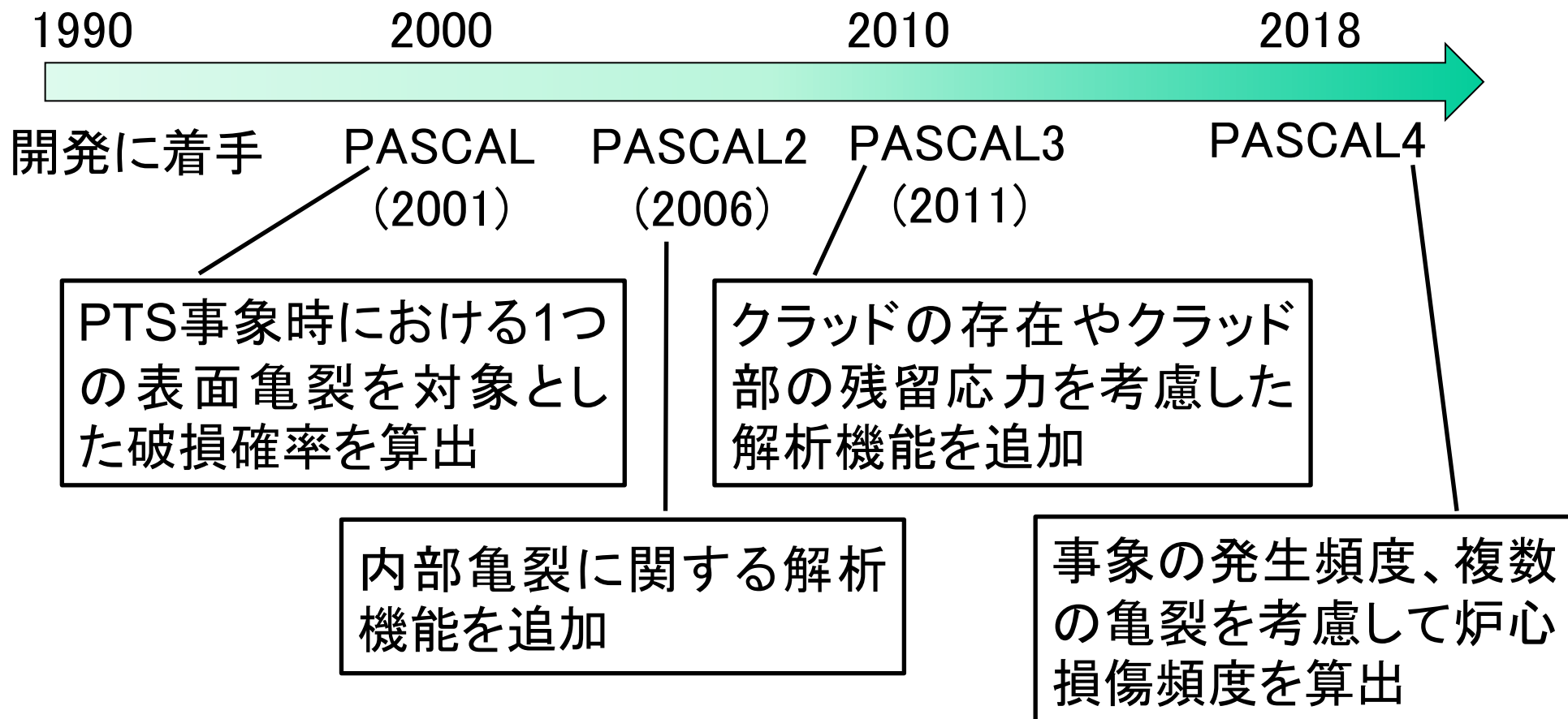
- 破壊靱性値 K_{Ic} 、応力拡大係数 K_I は不確実さを有する。
→不確実さを考慮して、合理的な破損頻度を求めることが必要
- 米国では破損頻度を数値指標とした規制活動が行われている。
- 新検査制度や安全性向上評価においてリスク情報の活用が期待されている。



RPVに対するPFM解析コードPASCAL

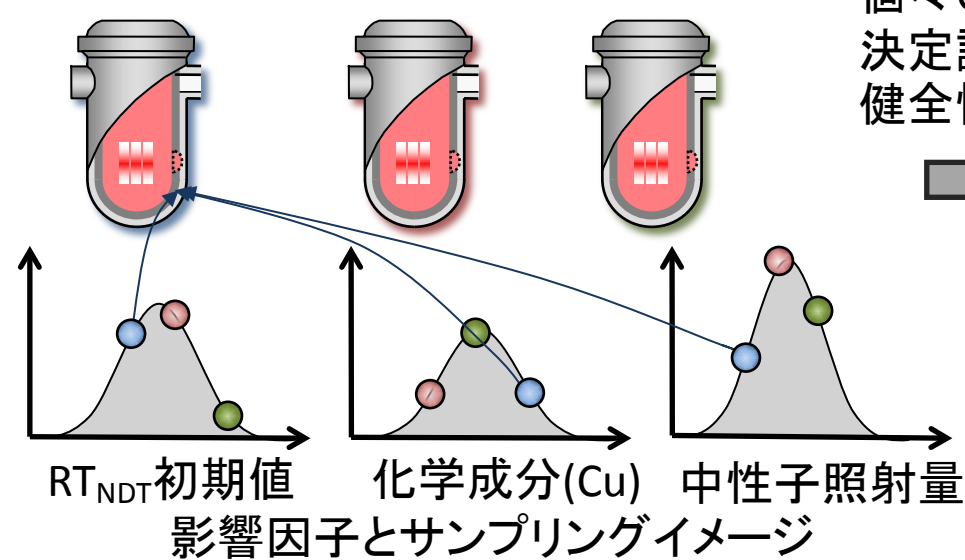
- 国内で唯一の国内RPVに対する破損確率・頻度を算出可能なPFM解析コードPASCALを1990年代から開発

PASCAL: PFM Analysis of Structural Components in Aging LWRs

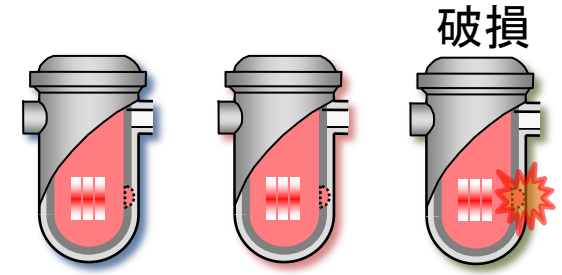


PFMの考え方

●のパラメータ セット ●のパラメータ セット ●のパラメータ セット



個々の容器に対しては
決定論的手法により、
健全性評価を行う



モンテカルロサンプリングを用いた場合
破損確率: $P_f = \frac{n_f}{N}$
 n_f : 破損に至るサンプリング数
 N : 全サンプリング数

PFMのメリット

- 影響因子の固有の確率分布を再現し、過度な保守性を排除した合理的な評価が可能
- リスク情報活用等における数値指標となる炉心損傷頻度に相当する亀裂貫通頻度を評価可能
- 安全性向上のための対策の効果等を定量的に示すことが可能

PFMの実用化に向けた研究開発

PFM解析手法・モデル及び解析コードの整備・検証

破壊靱性の確率論的評価モデル

溶接残留応力評価モデル

応力拡大係数評価手法等

国内外における比較解析と第三者による検証を実施

プレス発表

PFM解析に関する標準的解析要領

PFM解析の技術的要点、技術的根拠やその解説

標準的解析手法、データや代表的解析事例等

民間規格の策定
において引用

PFMの活用方策に関する検討

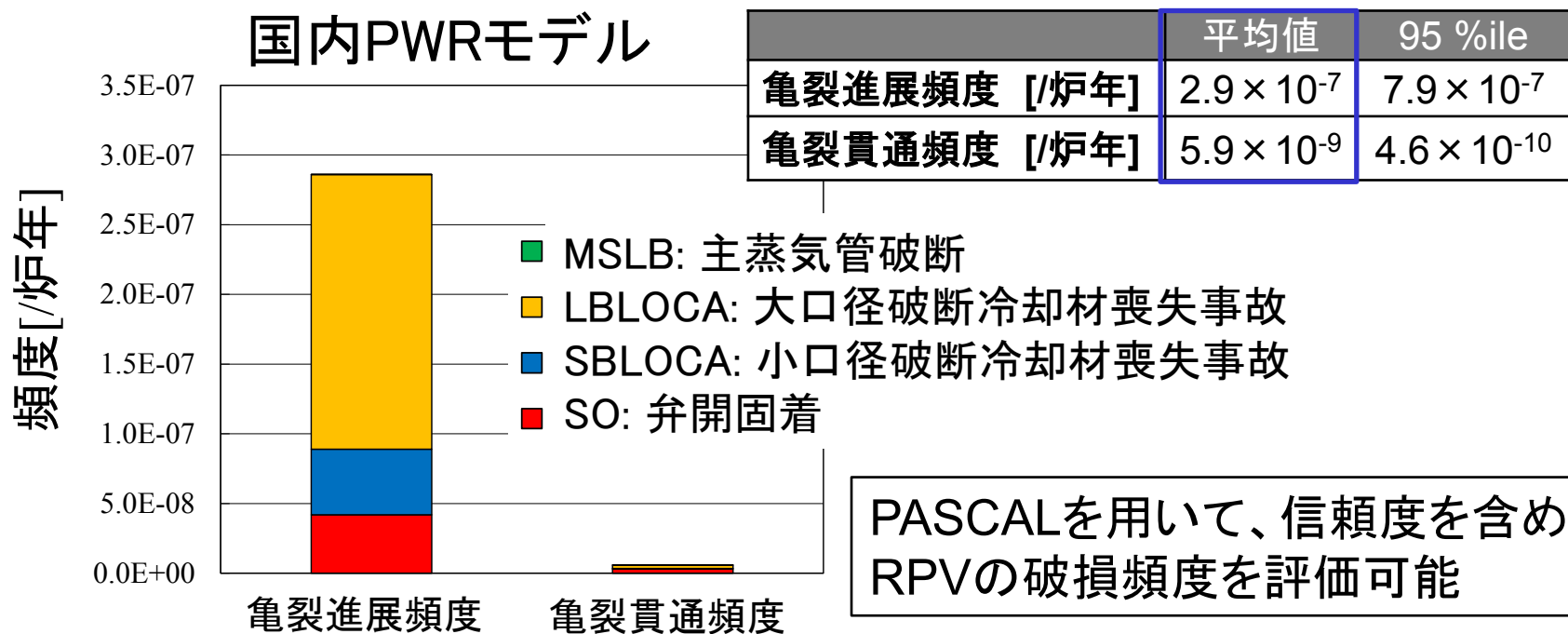
破損頻度の定量指標(破損確率、破損頻度)の検討

非破壊検査の影響効果、安全性向上評価に係る検討等

民間規格の国の
技術評価に貢献

亀裂貫通頻度の評価例

$$\text{亀裂貫通頻度} = \Sigma [\text{各事象におけるRPVの破壊確率} \times \text{各事象の発生頻度}]$$



PASCALを用いて、信頼度を含めてRPVの破損頻度を評価可能

その他のPFMの活用例

- 非破壊検査の有効性確認やリスク情報を活用した非破壊検査の検討
- 原子炉施設の安全性向上のための評価への活用 など

まとめ

照射脆化予測

- 予測値とその確信区間を評価する手法を整備
- 高照射量領域でSi含有量が脆化に影響

破壊靱性評価

- Mini-C(T)を用いてマスターカーブ法に基づく照射材の破壊靱性を評価

確率論的破壊力学評価

- PFMの実用化に向けた解析コードの整備や検証
- PFMの活用方策の検討