

# 原子炉圧力容器の 健全性評価手法の高度化

構造健全性評価研究グループ

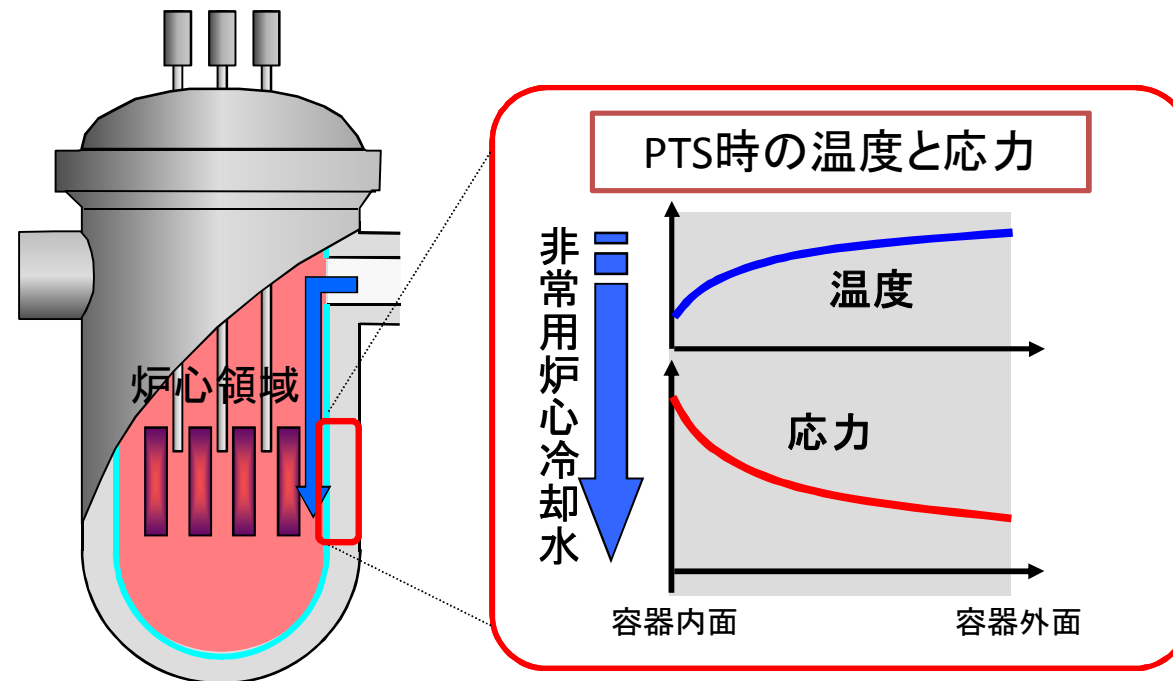
勝山 仁哉

# 研究の位置づけ

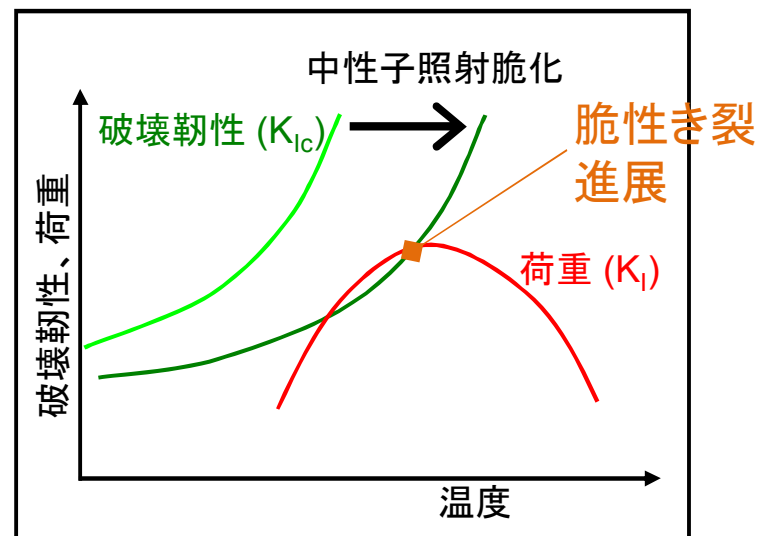
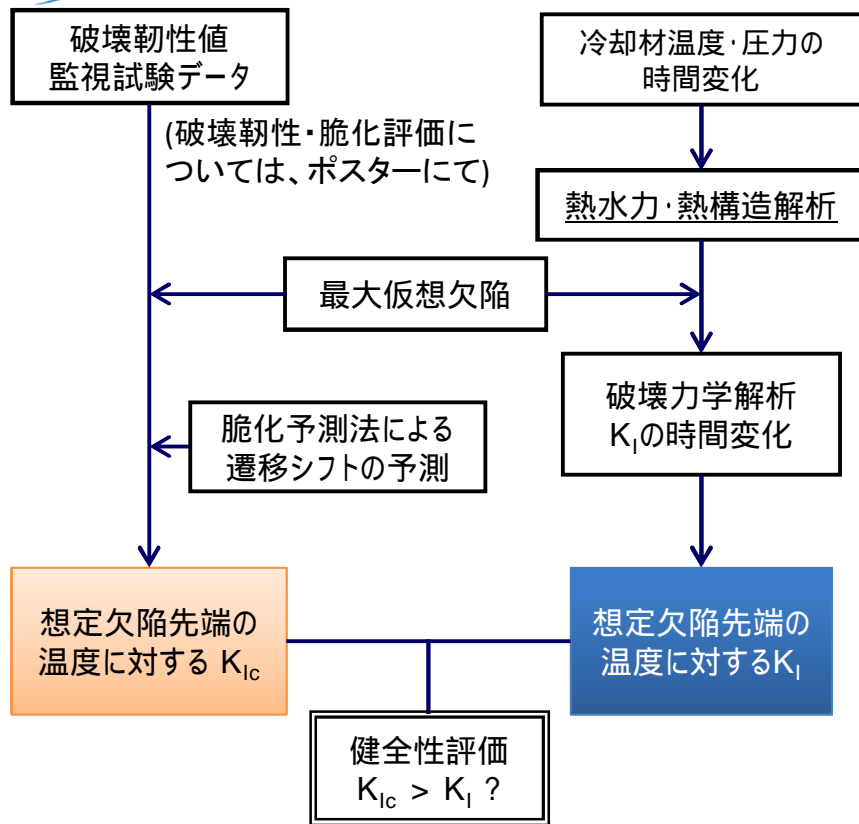
- 原子炉圧力容器 (RPV) は安全上最も重要な機器であり、交換が不可能
- 規制の動向
  - 高経年化技術評価
    - RPVの場合、経年劣化現象として中性子照射脆化が最も重要
  - 運転期間延長認可
    - 特別点検: 炉心領域では、対象部位は母材及び溶接部 (100%)
  - 安全性向上評価
    - 保安活動の実施状況の評価: 経年劣化現象として「中性子照射脆化」が明記されている。
    - 確率論的リスク評価: 炉心損傷頻度の評価が重要
- ⇒ RPVの健全性評価に関する精度向上及び確率論的評価手法
  - ✓ 米国では、RPVの破壊靱性要求に対して、すでに確率論的評価手法を導入 (スクリーニング基準 =  $10^{-6}$ /炉年)

# 加圧熱衝撃 (PTS; Pressurized Thermal Shock)

- 中性子照射脆化に関連して、加圧水型原子炉の供用状態C&Dにおいて、加圧熱衝撃 (PTS) は健全性評価上最も厳しい事象
- 「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」等の国内規格基準では、
  - 「想定される運転状態において脆性破壊を引き起こさないようにする」
  - PTS時にRPVの脆性破壊が起きないことを熱水力解析と破壊力学解析により評価するよう規定



# PTS時のRPV健全性評価の流れ



現行規格では、決定論的評価手法が規定されている。

破壊靱性や荷重の不確かさやばらつきを考慮した評価手法が必要

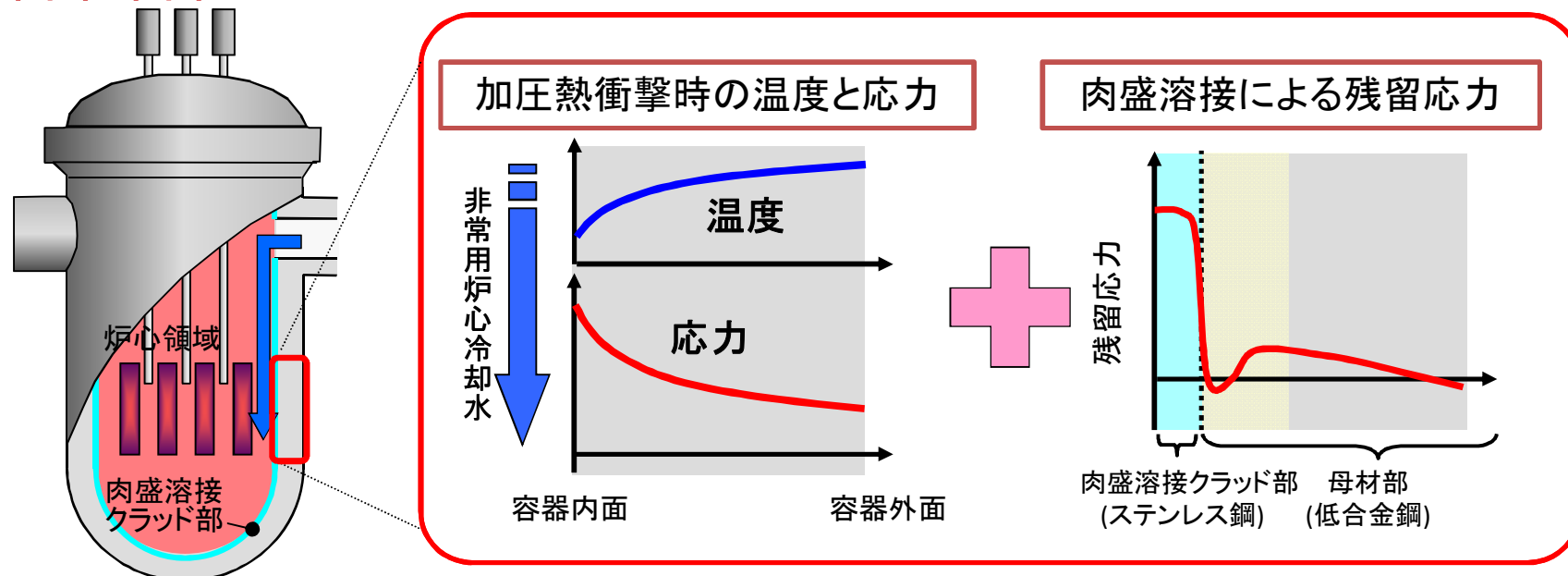
**荷重条件の詳細評価**  
最新シミュレーション技術により、PTS時の荷重条件を評価

**確率論的評価手法の整備**  
健全性評価に関するパラメータの不確かさやばらつきを考慮した評価手法を整備

# 荷重条件の詳細評価

## 背景

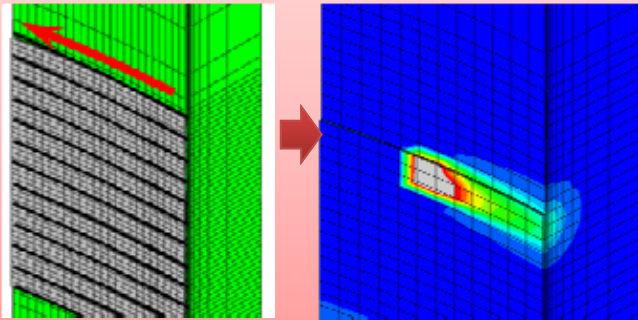
- 健全性評価を行う際には溶接残留応力を考慮することとなっている
    - ✓ 突合せ溶接部の残留応力は考慮されているが、構造部材ではない肉盛溶接クラッド部については、現行規格に記述がない
  - 現在高経年化技術評価に用いられる荷重条件は、20年以上前に一次元熱水力解析で導かれた温度履歴
    - ✓ 近年、三次元モデルを用いた温度、熱伝達係数等の解析が可能
- ⇒ **三次元モデルによるクラッド部の残留応力も考慮した荷重条件の詳細評価**



# 荷重条件の詳細評価の流れ

## 残留応力解析

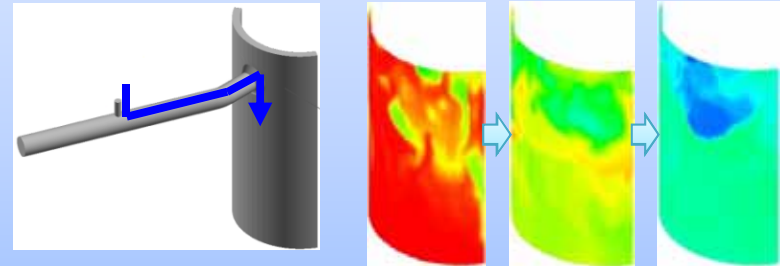
クラッド部に、溶接や溶接後熱処理により生じる残留応力分布を評価



例) 溶接シミュレーション

## 熱水力解析

CFD解析により、冷却材温度、熱伝達係数等の三次元的な分布を評価



例) 温度

## 熱応力解析

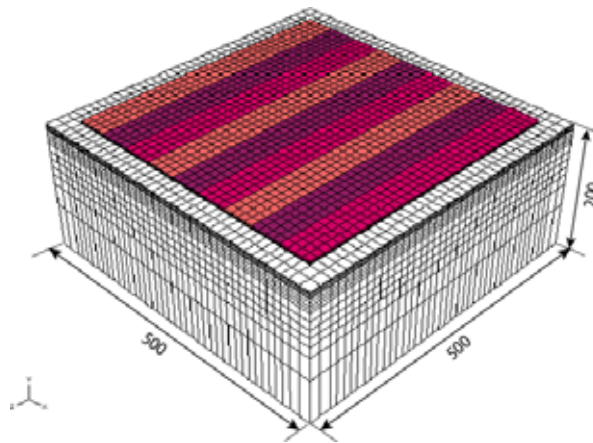
PTS時の想定き裂に働く荷重を評価

以上の三次元詳細解析により、  
 ➤ PTS時の荷重条件について、場所ごとの違いやばらつきを把握する。

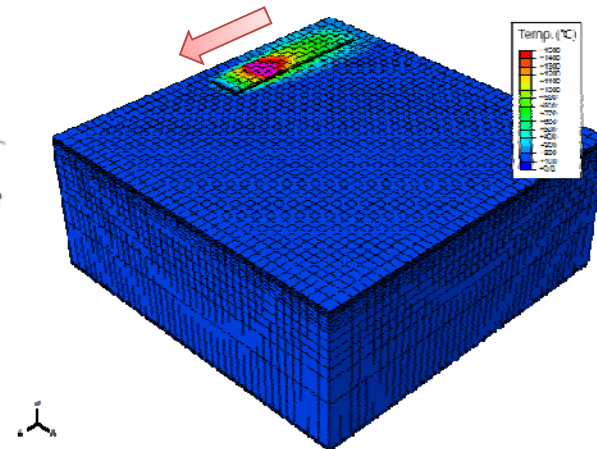
## 解析手法の妥当性確認

➤ 実験結果と解析結果を比較することにより解析手法の妥当性を確認

# 残留応力解析 - 解析条件 -



溶接試験体モデル (平板モデル)



溶接を模擬した移動熱源

- 溶接プロセス

1. 溶接 (オーバーレイ溶接)

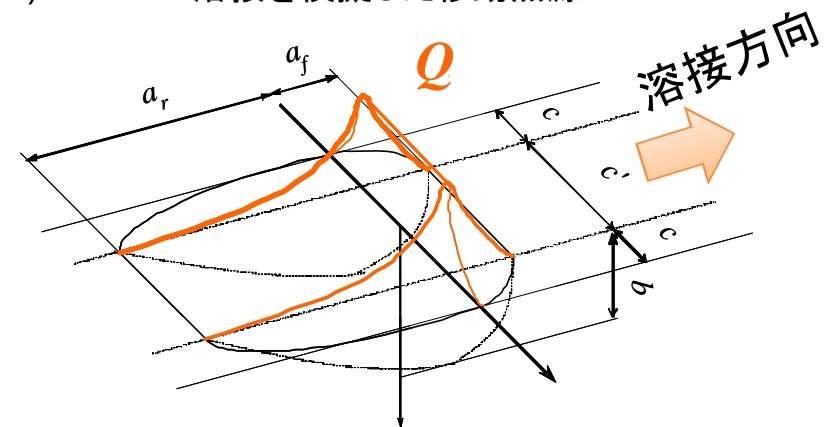
- 移動熱源: 帯状電極を模擬した幅広二重楕円モデルを開発

2. 溶接後熱処理 (PWHT)

- 620°C x 6時間

- 材料物性

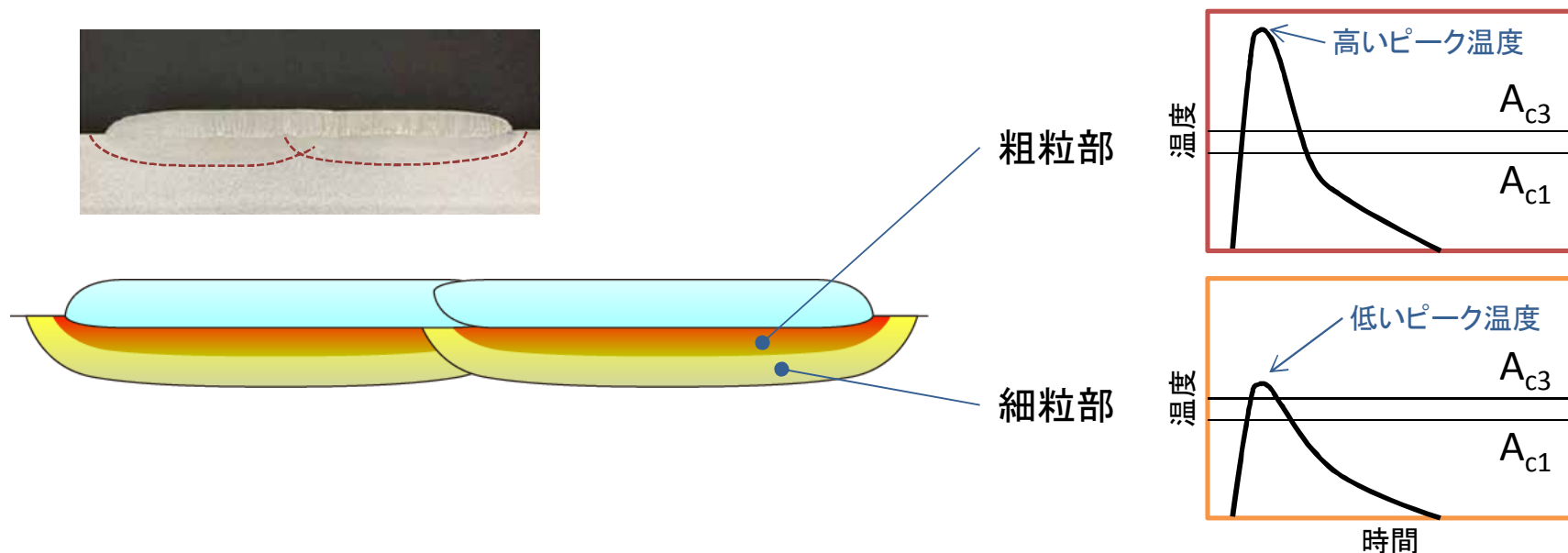
- 温度依存性を考慮
- 低合金鋼の相変態を考慮



帯状電極を模擬した幅広二重楕円モデル

# 溶接中に生じる相変態

- 溶接中に急加熱・急冷却されることにより、熱影響部では粗粒化や細粒化、相変態が生じ、材料特性が大きく変化
- 残留応力発生メカニズムを鑑みると、溶接中の相変態に伴う体積変化は残留応力分布に影響



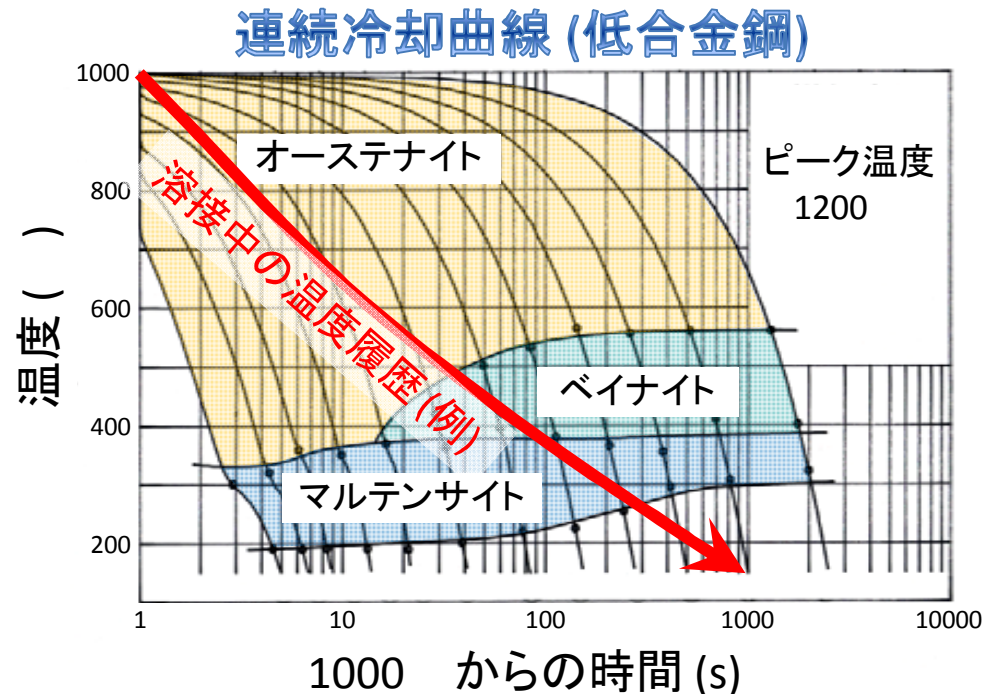
$A_{c1}$ : 低温相から高温相への変態開始温度  
 $A_{c3}$ : 低温相から高温相への変態終了温度



# 相変態のモデル化



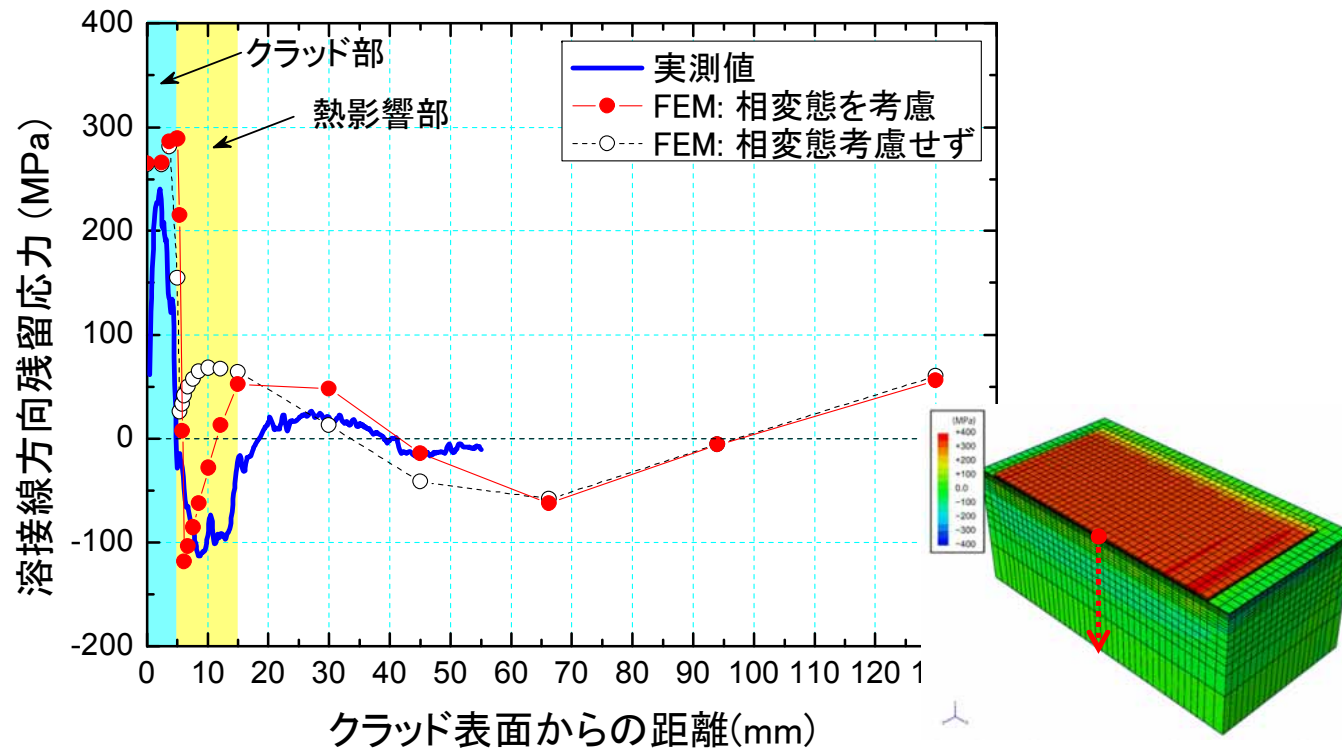
- 溶接による温度履歴を踏まえ、ピーク温度の異なる連続冷却曲線を実験により取得し、温度や冷却速度に基づき相変態を評価する手法を構築



- 相変態に伴う体積や強度等の材料特性の変化を再現するモデルを解析コードに導入し、残留応力を評価

# 残留応力解析 - 結果 -

- 溶接熱処理 (PWHT) 後の残留応力分布
  - 熱影響部の圧縮応力を再現
  - 母材深くまで引張残留応力が生じている

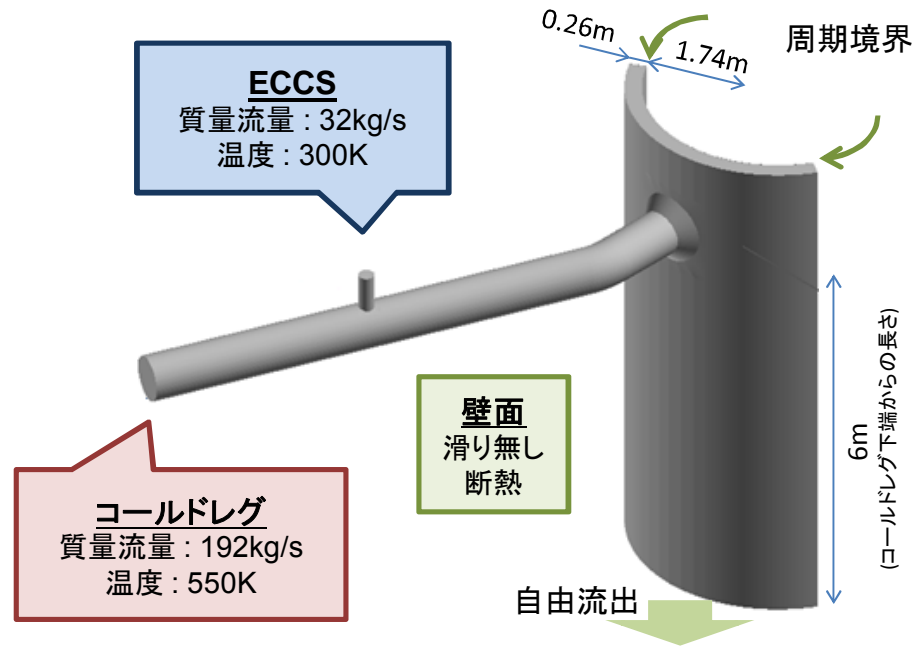


⇒ 解析結果と実測値はよく一致することから、残留応力解析において相変態を考慮する必要があることを示した。

# 熱水力解析 –モデルと解析条件–

LSTF実験で妥当性を確認した解析手法 (CFD: Computational Fluid Dynamics) を用いて解析を実施

- 3ループRPVにおける小口径配管破断冷却材喪失事故 (SBLOCA)

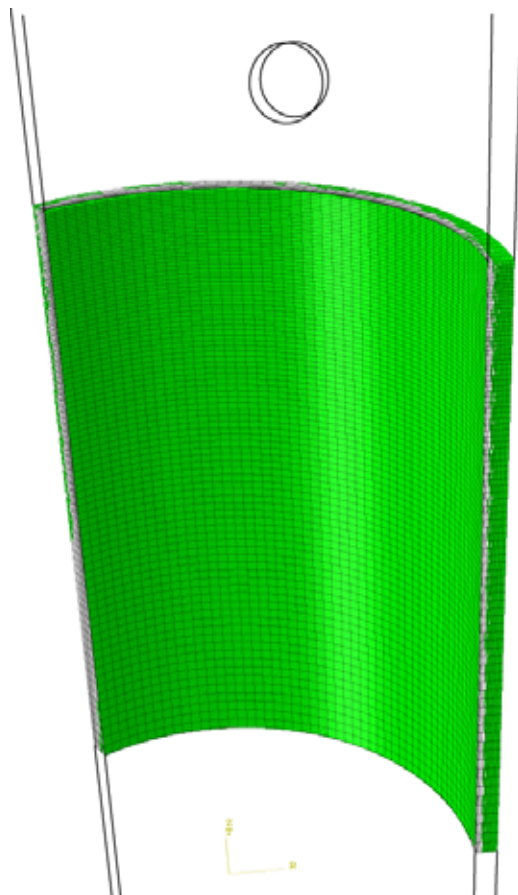


注) 条件は、LSTF実験で想定したSBLOCAを参考に、モデルプラントの形状にあわせて調整

基礎方程式	非定常圧縮性ナビエーストックス方程式
離散化手法	有限体積法
速度-圧力カップリング	SIMPLEC
乱流モデル	SST k- $\omega$
時間積分法	2次精度クランクニコルソン陰解法
対流項スキーム	3次精度風上法
時間刻み	$1.0 \times 10^{-2}$ [sec.] (最大クーラン数: ~5)

# 熱応力解析 -解析条件-

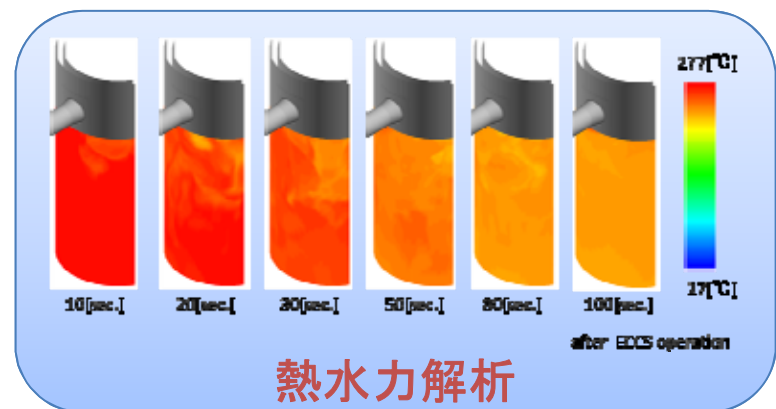
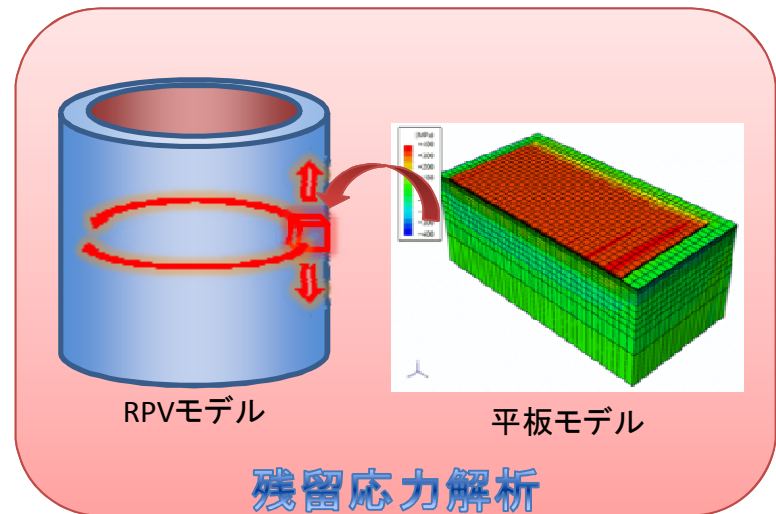
- PTS時に想定き裂に働く荷重を評価
  - 残留応力解析と熱水力解析の結果を入力データとして用いて、熱応力解析を実施



平板モデルで求めた残留応力分布をRPVモデルにマッピング

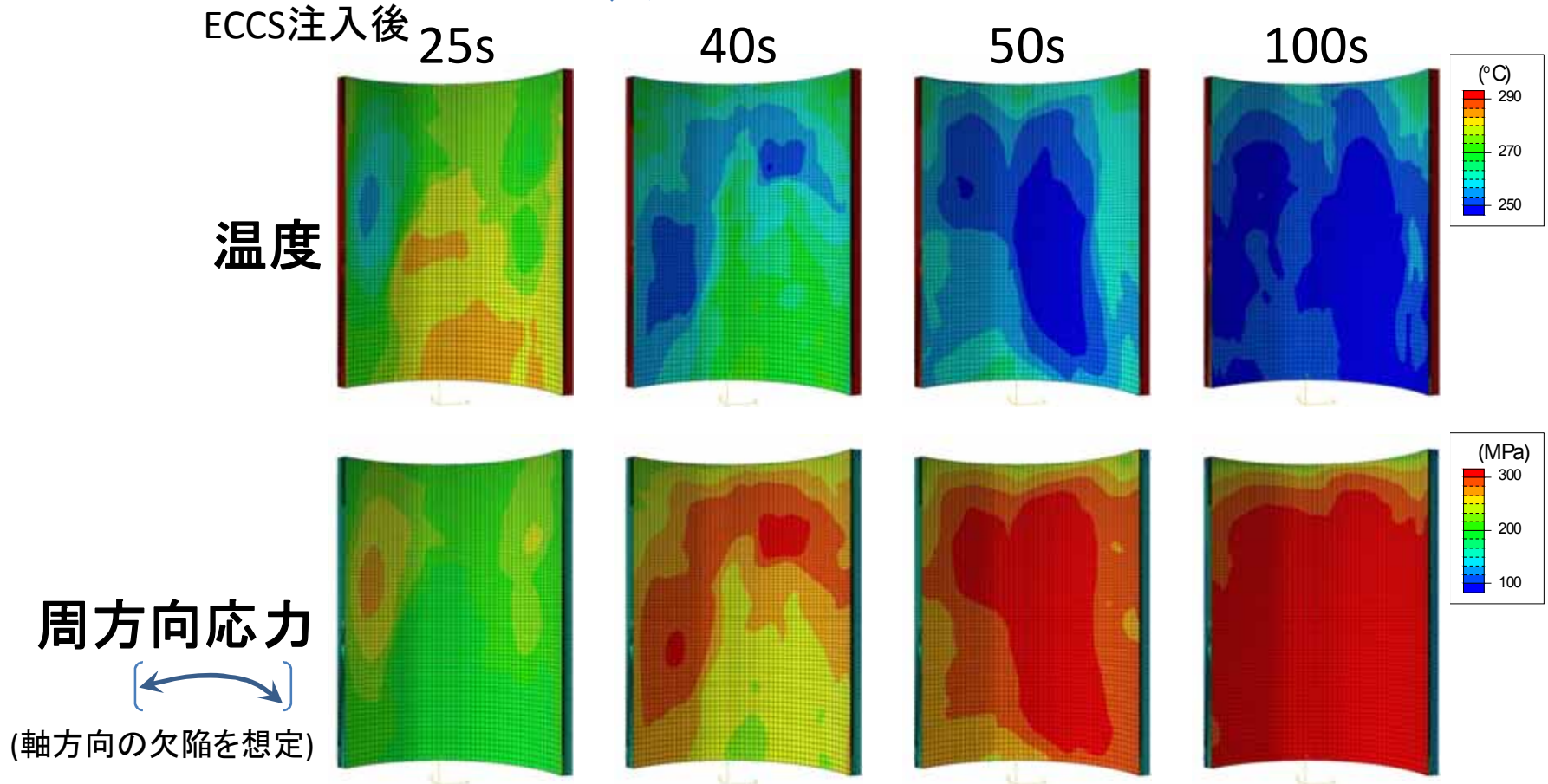


温度、熱伝達係数、圧力をRPVモデル内表面に適用



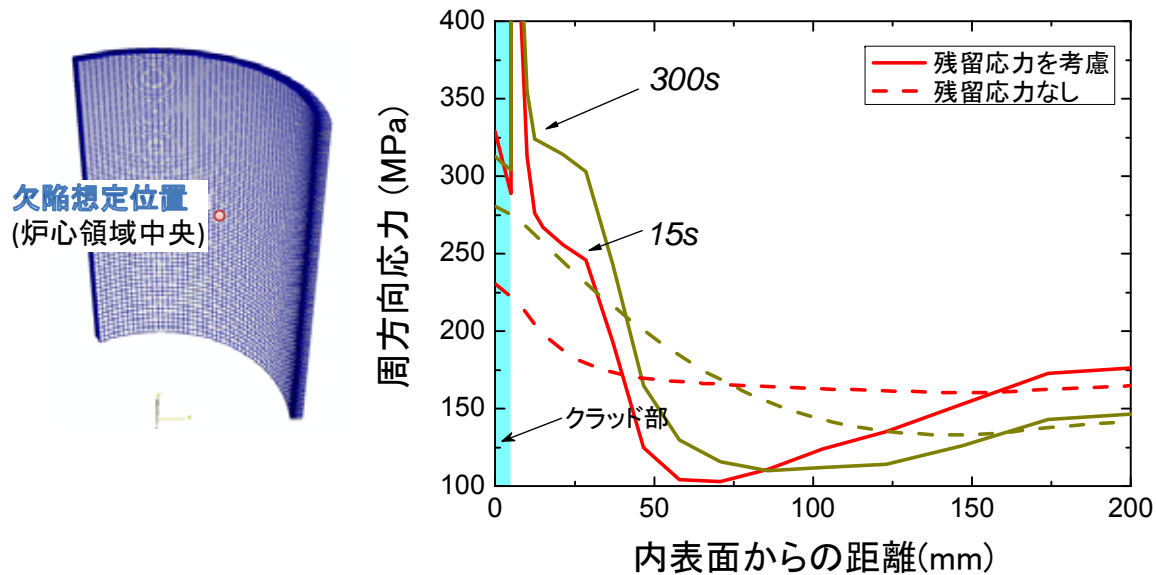
# 熱応力解析 -結果-

## 内表面のコンター図



- RPV内面の温度分布は複雑
- 温度分布と同様、応力分布も複雑

# 熱応力解析 -結果-

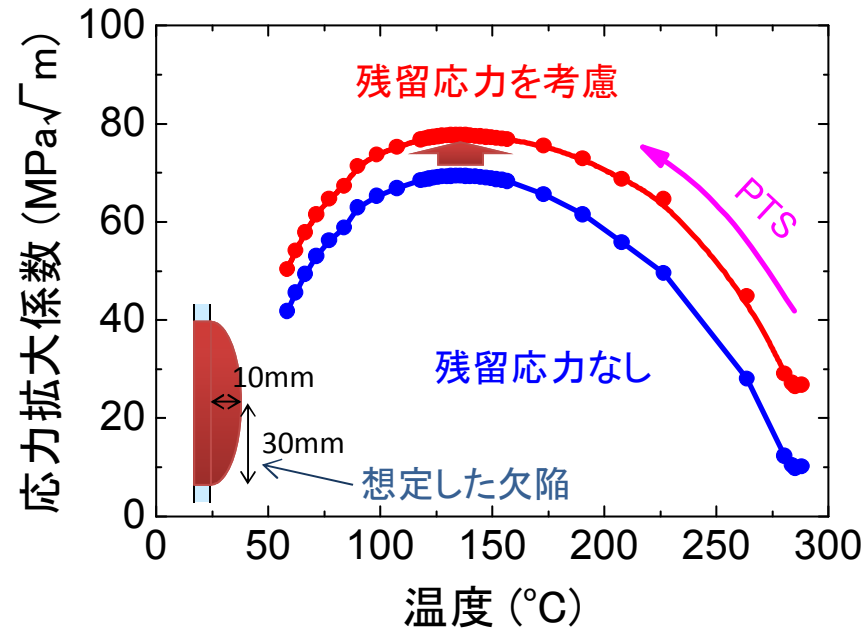


PTS時の周方向応力分布

- 残留応力を考慮すると、考慮しない場合に比べてRPV内表面近傍に高い引張応力が発生
- 最新知見・解析技術を踏まえた詳細評価手法を確立



# 荷重 ( $K_I$ ; 応力拡大係数) の比較



PTS時の応力拡大係数の比較

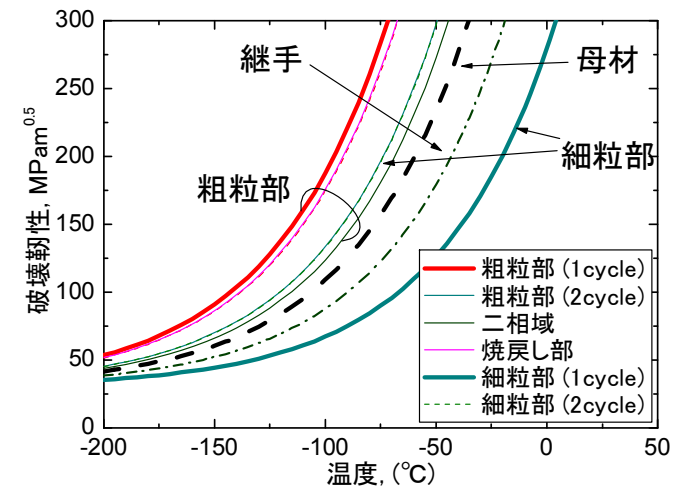
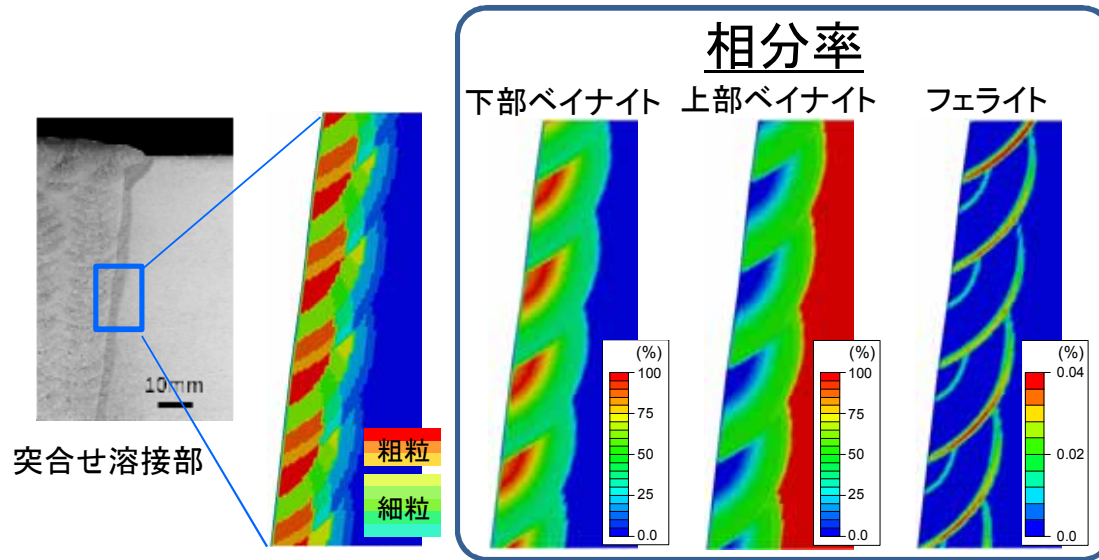
- クラッド部の残留応力を考慮しない健全性評価は非保守的
- 健全性評価においてクラッド部の残留応力を考慮する必要があるという知見は、原子力設備の健全性評価に係る規格改訂の根拠資料に採用

➤ 今後、三次元詳細評価手法により得られる荷重条件の分布やばらつき等について、確率論的評価手法への反映を検討

# 熱影響部の評価

## 背景

- 熱影響部の監視試験片は、国内外の規格で省略可能とされているが技術的根拠は不明確であり、熱影響部の脆化予測も評価されていない。
- RPVのような厚肉溶接継手における熱影響部は、多層盛溶接に伴い非均質な組織 ⇨ 破壊靱性等には局所的な分布



未照射の熱影響部の破壊靱性

- 熱影響部の組織を再現する熱処理や相変態を考慮した解析により熱影響部の非均質性等を把握
- 2013年度日本保全学会賞論文賞受賞



# 確率論的評価手法の整備

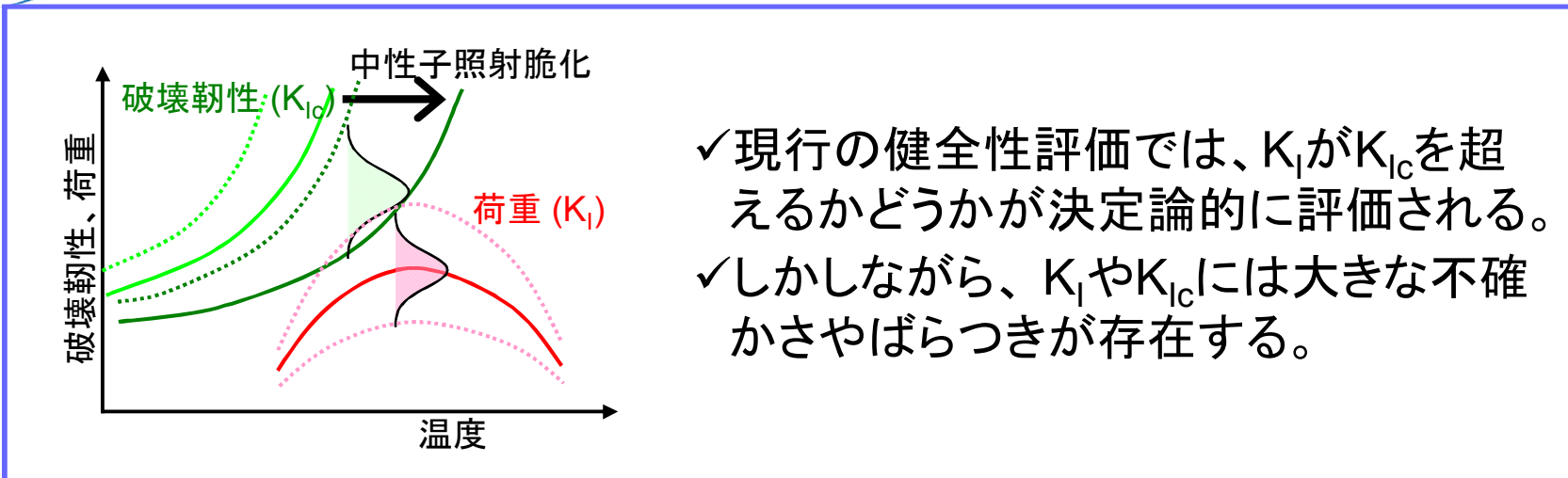
## 確率論的評価の重要性

- 長期供用に対する安全水準の維持等を図っていくため、近年欧米において導入が進められている確率論的評価体系の国内基準への導入が重要な課題となっている。
- ⇒ 確率論的破壊力学 (PFM) 解析により炉心損傷頻度に相当するき裂貫通頻度 (TWCF) を評価

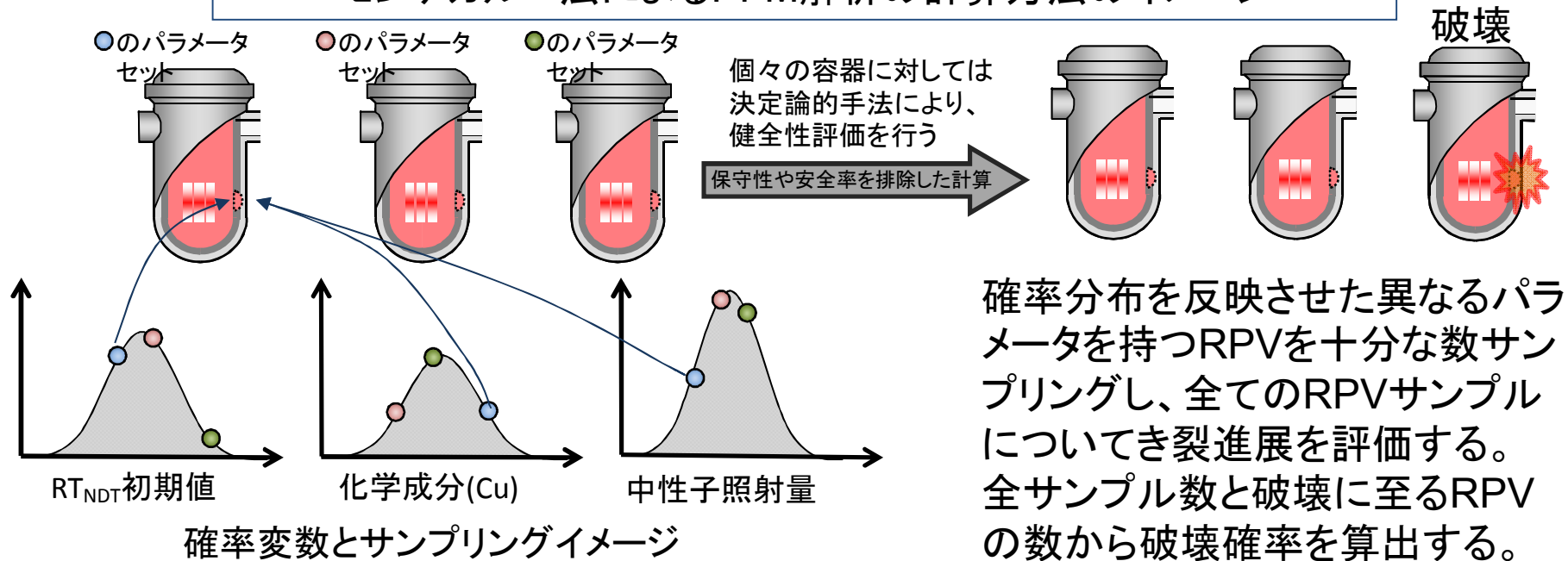


PFM解析の標準化に向けて、標準的入力データ・解析手法の整備と標準的解析要領の作成を進めている。

# 確率論的破壊力学 (PFM) 解析手法の概要



## モンテカルロ法によるPFM解析の計算方法のイメージ





# 確率論的破壊力学 (PFM) 解析コードPASCAL

PASACAL: **P**FM **A**nalysis of **S**tructural **C**omponents in **A**ging **L**WR

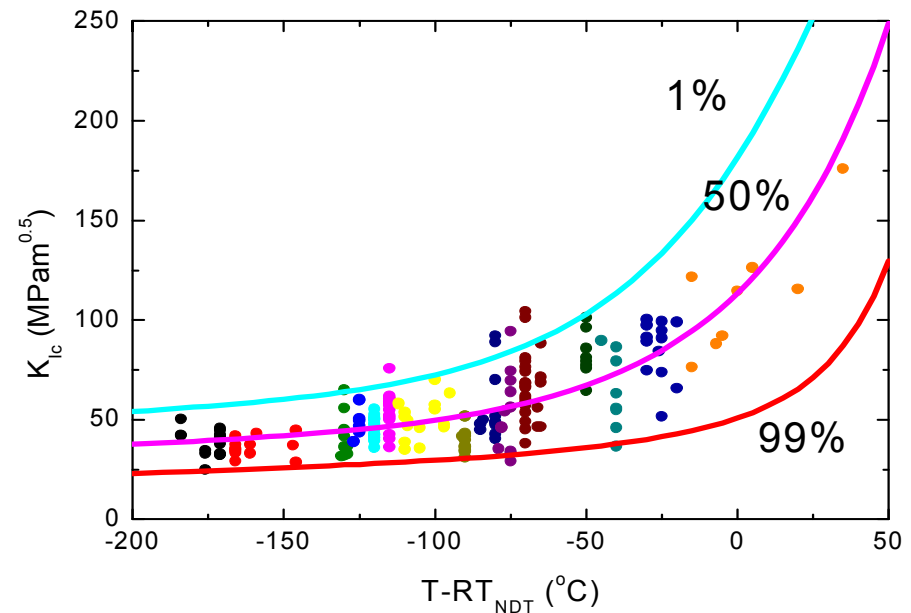
## PASCALの特徴

- RPVにPTS等の過渡荷重が発生した場合におけるRPVの破壊確率を解析するコード
  - 国内規格 (日本電気協会規定) に基づく評価が可能
    - ✓ 健全性評価フロー
    - ✓ 最大仮想欠陥の設定
  - 国内データに基づく評価が可能
    - ✓ 国内鋼材の破壊靱性データ ( $K_{Ic}$ ,  $K_{Ia}$  データ)
    - ✓ 脆化予測法 (JEAC4201-2007 (2013年追補版))
    - ✓ 非破壊検査による欠陥検出確率 (UTSプロジェクト)
  - 熱影響部の非均質性を考慮した評価が可能

# PASCALの機能向上と信頼性確認

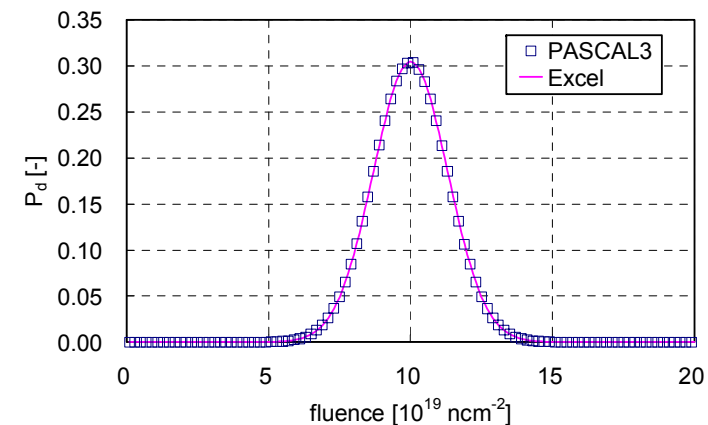
## 確率論的評価モデル開発の例

- 破壊靱性 $K_{Ic}$
- 国内プロジェクトで構築された国産のRPV鋼データベースを整備
- き裂進展メカニズムを踏まえ、ワイブル分布に基づく確率論的評価モデルを開発
- 1, 50, 99%の曲線の下にあるデータ数により、開発したモデルの妥当性を確認



## 確率変数に関する機能検証の例

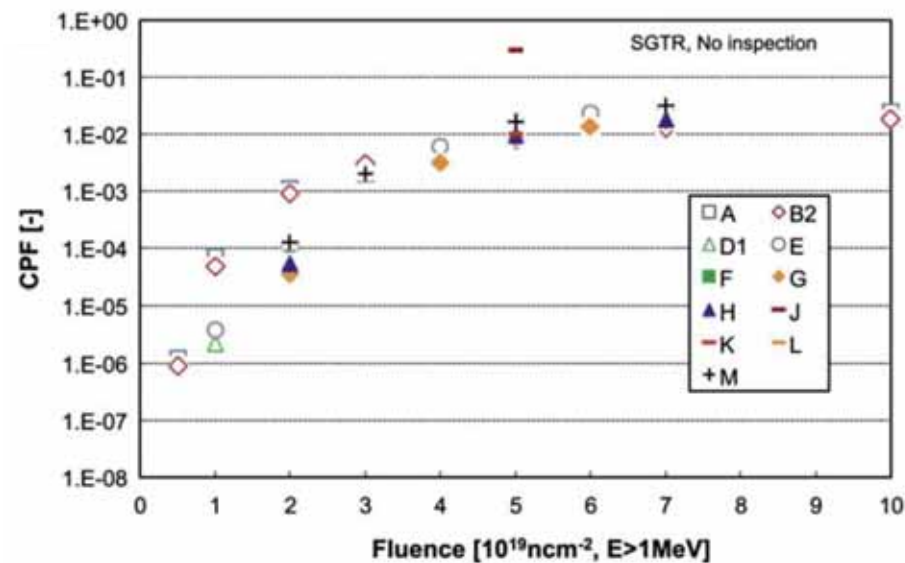
- 検証例: 中性子照射量 (正規分布)
- 中性子照射量をPFM解析における最小サンプル数(例えば $10^6$ )について求め、統計処理
- $\chi^2$ 検定により、PASCALで得られた分布が正規分布に従うことを確認



# ベンチマーク解析



- 実験的にRPVの破壊確率を求めることは極めて困難
- 異なる国、機関や解析コードで評価を行い比較するベンチマーク解析が有効な手法
  - 日本、中国、韓国、台湾から12機関が参加し、ベンチマーク解析を実施
- PFM解析コード: PASCAL, WinPraise, Own codes
- 主な結果
  - RPVの破壊確率はほぼ一致し、各解析コードにより算出される破壊確率の妥当性が確認された。



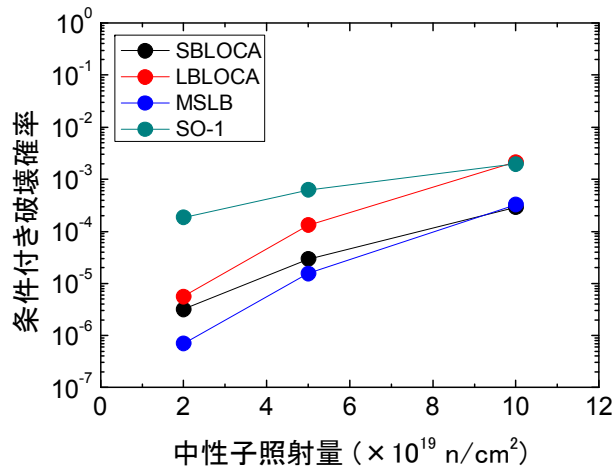
今後もベンチマーク解析等を通じて、PFM解析コードの信頼性向上を図る。

# 確率論的評価手法の活用

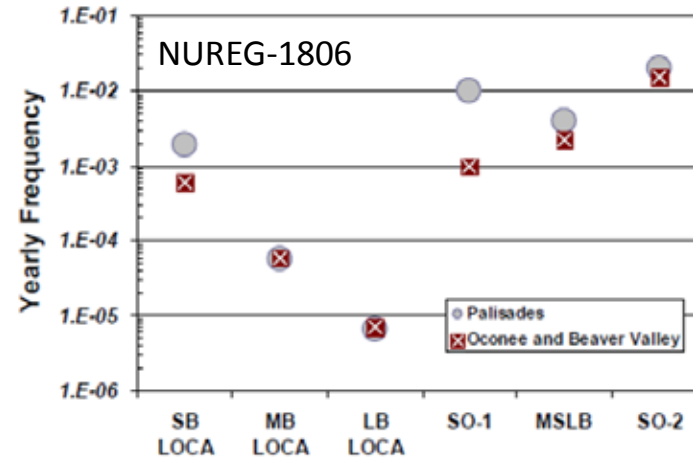
例: き裂貫通頻度 (TWCF) の評価

TWCF (炉心損傷頻度)  
 =  $\Sigma$  (供用状態C及びDに対するPTS事象\*)の総和)  
 [各事象のRPVの破壊確率 (PFM解析により算出)  
 × 各事象の発生頻度]

\*)小破断LOCA, 大破断LOCA, 主蒸気系破断, バルブ開固着等



PASCALで算出した各事象の破壊確率



各事象の発生頻度 (米国の例)

=

中性子照射量 [ $\times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ]	き裂貫通頻度 (TWCF)
2	$9.9 \times 10^{-11}$
5	$1.1 \times 10^{-9}$
10	$1.5 \times 10^{-8}$

米国のプラントを対象  
とした試解析結果

PASCALを用いて、炉心損傷頻度に相当するき裂貫通頻度を評価可能

# まとめ



- RPVの健全性評価において最も重要なPTS事象に関する最近の研究成果を紹介
  1. PTS時の荷重詳細評価
  2. 確率論的評価手法の整備・標準化への取組み

## 今後の計画

- 研究成果を通じて、規格基準の改訂に有用な評価手法や技術的根拠を提示

# 構造健全性評価研究グループにおける取組み



- PFM解析コードの信頼性向上と対象部位の拡充
  - 一次系配管における応力腐食割れ、疲労、減肉
  - 複雑形状部における応力腐食割れ (PWSCC) <sup>\*</sup>
- 設計上の想定を超える事象にも研究対象を拡張
  - 巨大地震時の一次系配管健全性評価手法 <sup>\*</sup>
  - シビアアクシデント時の機器類の破損評価手法 等

<sup>\*</sup> これまでの成果をポスターで発表