



# 確率論的破壊力学の実用化に向けた 電中研の取組み

---

(一財)電力中央研究所  
エネルギートランスフォーメーション研究本部

2022年9月6日

 電力中央研究所

# 目次

---

- ◆ 確率論的破壊力学 (PFM) の概要
  - PFMへの期待、PFMの概要、活用方法
  - 米国での適用例
  - PFM実用化に向けた課題
- ◆ 電中研の取組み

## PFMへの期待

---

- ◆ 現行の決定論的な構造健全性評価では、評価の各段階で保守性を見込んでおり、最終的な評価結果には過度な保守性を有する可能性がある。そのことが合理的なプラントの運用や維持管理を妨げている可能性がある。
- ◆ 確率論的破壊力学(PFM)を基礎とした健全性評価手法では、保守性を定量的に評価することができ、過度な保守性を排除した適切なマージンを設定できることが期待されている。

# PFMの反映先、活用方法、研究開発対象の検討

## ◆ 確率論的健全性評価の反映先

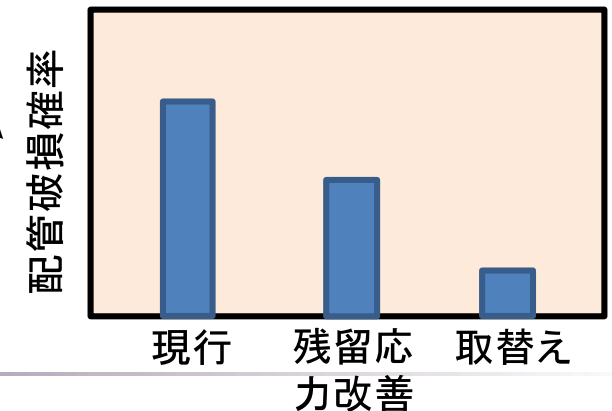
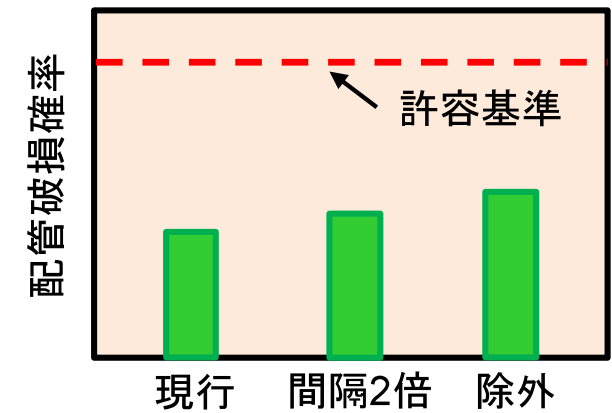
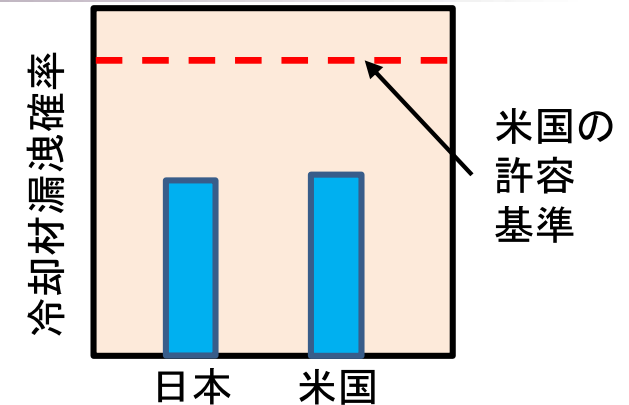
- 安全性の向上(規制機関、事業者)
- 保全の合理化(事業者)
- 審査の重点化(規制機関)
- 研究開発方針、内容の決定(研究機関)

## ◆ 活用方法

- 劣化事象(例えば、PWSCC)に対する機器の健全性を定量的に示す。
- 非破壊検査要求の重点化/緩和の技術的根拠とする。
- 評価式や予測式の改定の技術的根拠とする。
- SCC対策の有効性を示す技術的根拠とする。
- 研究開発の優先順位を決める技術的根拠とする(確率分布変数の感度解析)。

## ◆ 研究開発対象の選定(優先順位付け)

- 適用目的対象機器/劣化事象の選定



# 確率論的破壊力学(PFM)の適用対象機器

## ◆ 原子炉圧力容器

- PWRの加圧熱衝撃(PTS)評価
- 供用期間中検査(ISI)の100%体積検査(UT)範囲の低減
  - 100%体積検査要求の緩和

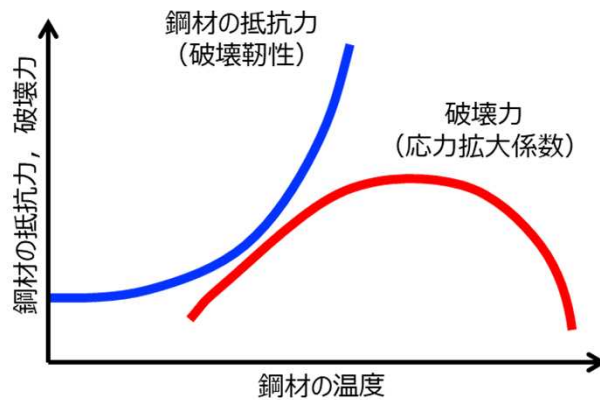
## ◆ 配管・ノズル等の耐圧バウンダリ

- 供用期間中検査の高度化/合理化
- SCC対策技術等の効果の定量化

# PWRのPTSに対するPFM評価の模式図

構造健全性を破損確率という定量的な指標で示すことができる

決定論的評価



1. 設定された確率分布に従って、各パラメータの値をサンプリングする。
2. 1のサンプリングで得られたパラメータのセットを用いて、決定論解析を実施する。パラメータのセット1つごとに「評価対象は破壊に至らない」もしくは「評価対象に破壊が発生する」という結果が得られる。
3. 1から2を1000回、10000回、100000回と繰り返し、破壊と判定された回数をカウントする。
4. 十分な回数の計算を実行した後、破壊回数 / 計算回数を破損確率として算出する。

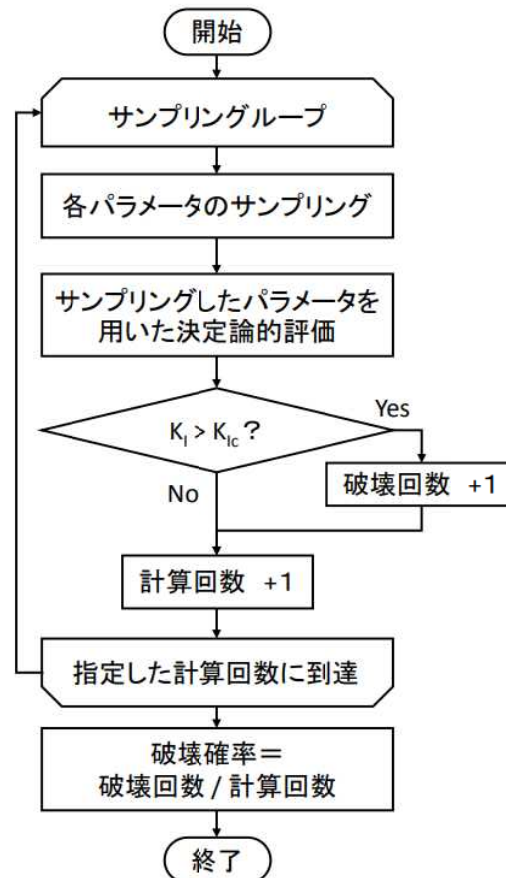


図3 モンテカルロ法のフローチャート

確率論的評価

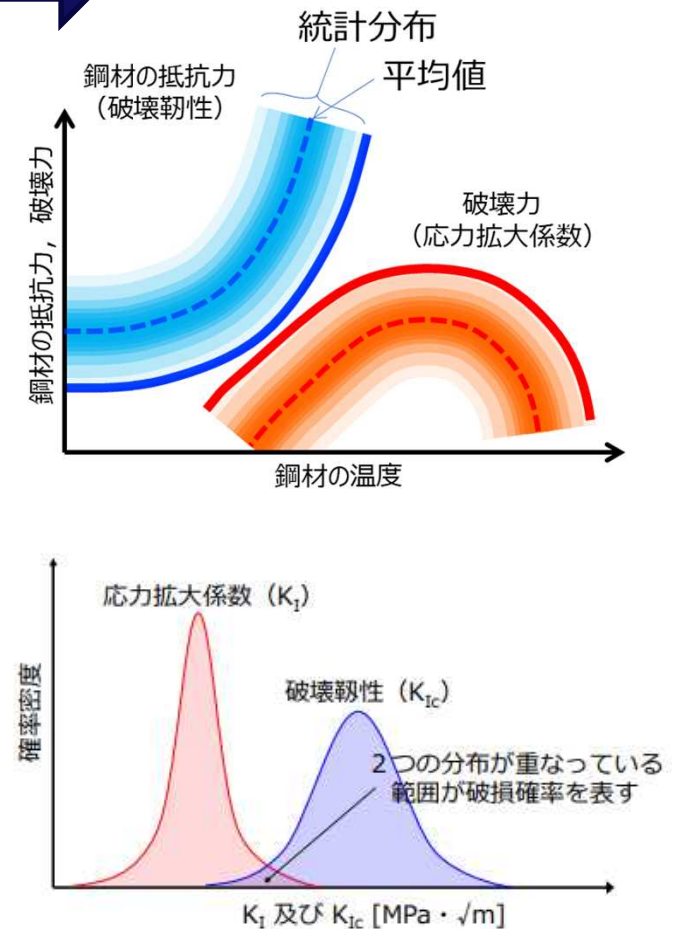
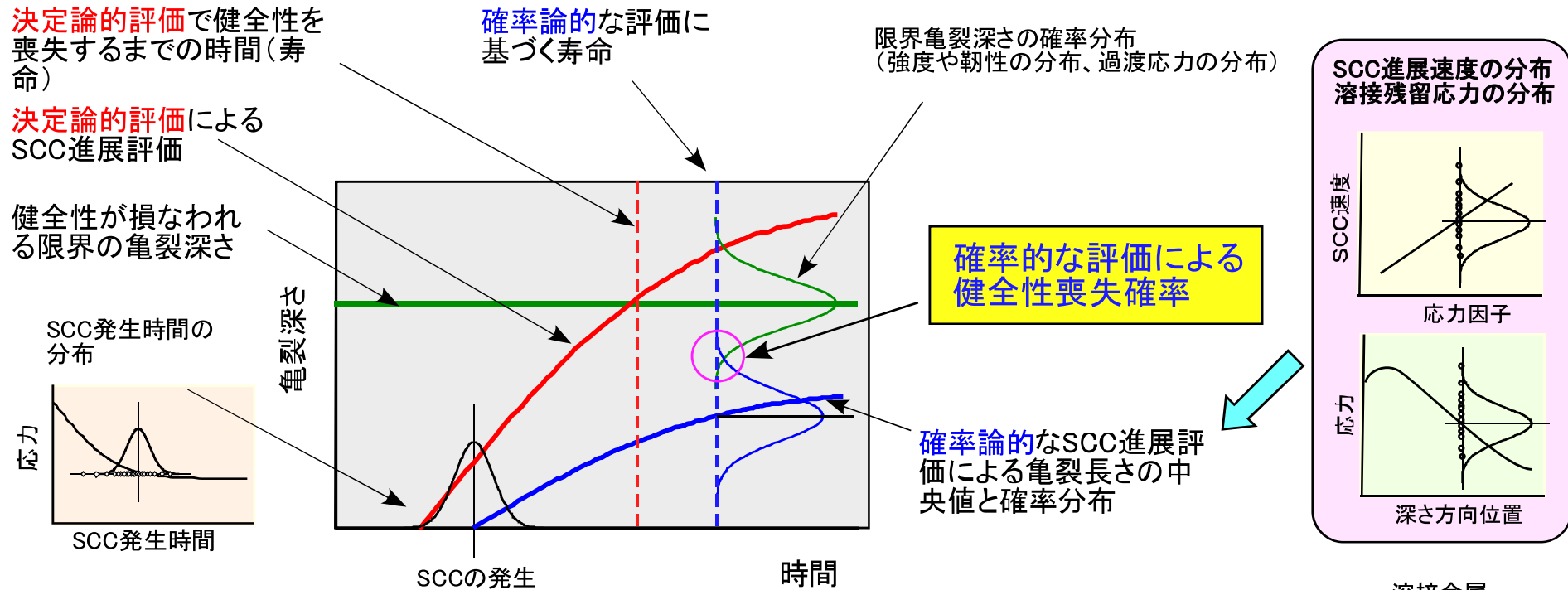
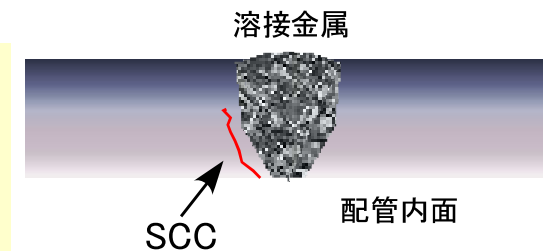


図1 破損確率と  $K_I$  及び  $K_{IC}$  の関係図

# SCCに対するPFMを用いた評価の模式図



- 決定論的評価:**
  - ✓ 個々のステップで保守性を入れて評価。
  - ✓ 定量的な評価が難しいものについては、保守側に評価。
- 確率論的評価:**
  - ✓ 中央値については保守性を入れずに算出
  - ✓ 中央値からの乖離を分布として与える。



非破壊検査については本模式図には含めていない。

# 米国におけるPFMの活用

## ◆ 加圧熱衝撃(PTS)の代替評価法の選定に活用。

- 10CFR50.61(1985年)は、中性子照射脆化による延性脆性遷移温度の上昇を考慮した遷移温度 $RT_{PTS}$ を継続運転可否の指標をして設定。
  - 鍛造材, 圧延材および軸方向溶接:  $RT_{PTS} < 132^{\circ}\text{C}$
  - 周方向溶接:  $RT_{PTS} < 149^{\circ}\text{C}$
- NRCは10CFR50.61制定当時の保守性を評価
  - 確率論的評価コードFAVORを用いてPTS事象を精緻化
  - 破壊靱性値取得法の精緻化、想定欠陥位置と寸法の適正化、位置による脆化度合いの考慮
- 代替規則10CFR50.61a(2015年)
  - より詳細な場合分け(圧延、鍛造、母材、軸方向、周方向、板厚方向深さ)を行い、それぞれに $RT_{PTS}$ を設定
  - 新たな脆化予測式の採用
  - PFMにより算出したTWCF(亀裂貫通頻度):  $1 \times 10^{-6}$ 炉年をベースに遷移温度の要求値を設定
  - 代替規則を使った申請が発電所より出されている。



# 米国における確率論的評価の活用(1/2)

## ◆ BWRにおける原子炉圧力容器溶接部の検査の緩和の提案

- RPVの炉心領域の溶接継手に対して実質100%の試験が要求されている(10CFR50.55a)。
- EPRIはVIPERコードを用いたPFM評価結果を基に試験程度の低減に関する提案を行った。
- NRCはFAVORコードを用いて評価を実施し、EPRIの提案の妥当性を検討、技術的な根拠については妥当と認めた。
- NRCは周方向の溶接線については試験程度の緩和が認められたが、縦方向溶接線については、深層防護の観点から緩和を認めなかった。
- 判断基準
  - PWRの加圧熱衝撃(PTS)事象による破損頻度の許容基準: $<5 \times 10^{-6}$ /炉年 [NRC RG1.154]
  - 炉心損傷頻度(CDF): $<10^{-4}$ /炉年 [NRC RG1.174]
  - 早期大規模放出頻度(LERF): $<10^{-5}$ /炉年 [NRC RG1.174]

## 米国における確率論的評価の活用(2/2)

### ◆ ステンレス鋼鋳鋼に対する許容欠陥寸法の提案[1]

- EPRIにより開発されたCASSPAR (Cast Austenitic Stainless Steel Probabilistic Analysis of Reliability)コードを用いて、ステンレス鋼鋳鋼の許容欠陥寸法を検討
- 熱時効による破壊靱性低下、プラント過渡による疲労亀裂進展を考慮。
- 破損確率が運転状態A、B、Cのそれぞれに対して $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$ となる欠陥寸法を検討、これを基に許容欠陥寸法を設定
- ASME Section XI Code CaseN-838—Flaw Tolerance Evaluation of Cast Austenitic Stainless Steel (CASS) Piping Components[1]の技術的根拠

### ◆ RI-ISI(Risk Informed In-service Inspection)

- RI-ISI手法の一つであるWH法にPFMを活用した検査頻度の設定方法が取り込まれている。

# 国内におけるPFMに関する技術基盤整備

## ◆ 原子炉圧力容器（中性子照射脆化）

- 以下のコードの技術開発やベンチマークが進められている。
  - JAEA: PASCAL4
  - 産業界: 米国FAVOR、FERMAT（電中研）
- PFMの実活用に関する検討委員会の活動
  - 東大、JAEA、電中研、東京電力、関西電力、MHI、テプコシステムズ
  - 実機を対象とした原子炉容器のPFM解析、解析結果の分析など
- 電気協会ガイド「確率論的破壊力学に基づく原子炉圧力容器の破損頻度の算出要領」(JEAG 4640-2018)
- 実用化に向けた明確な道筋ができていない。

## ◆ 配管、ノズル、炉内構造物（SCC）

- JAEAのPASCAL-NP、PASCAL-SP、PEDESTRIAN（電中研）、PEPPER-M（TEPSYS）など複数のコードが開発され、ベンチマーク解析も行われているが、研究開発は停滞気味である。

# PFMの実用化に向けた課題

## 【1】 PFM活用方針の明確化

- ◆ PFMの活用について関係者間で十分な議論がなされていない。
- ◆ 有効活用に不可欠と考えられる許容基準が決まっていない。

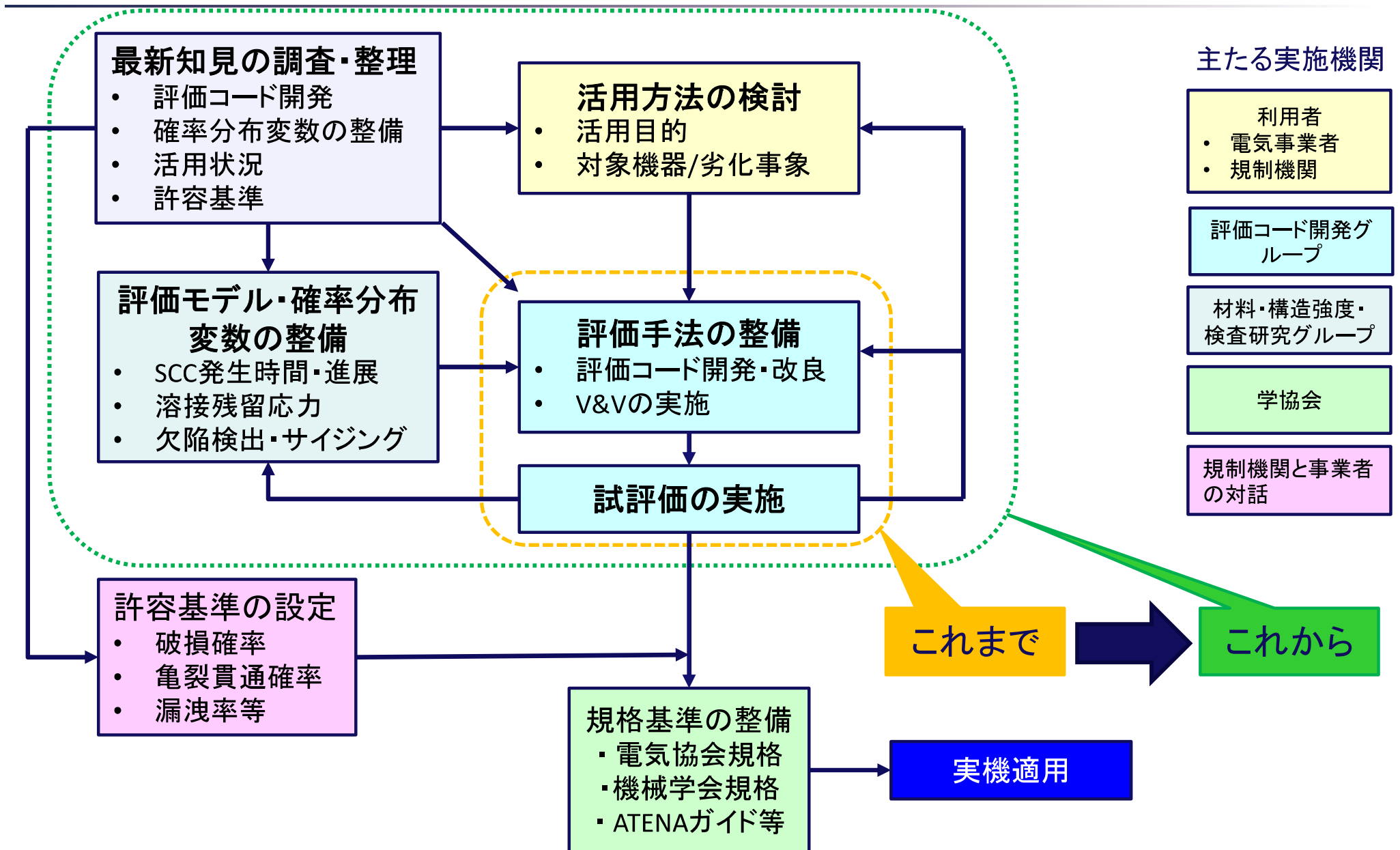
## 【2】 PFMに関する技術基盤の整備

- ◆ PFM解析の信頼性や精度が不明瞭である。
- ◆ 実用化するために必要な技術基盤が明確になっていない。
- ◆ 規格基準整備（現行のJEAG 4640-2018で十分か？）

## 【3】 PFMの認知度の向上

- ◆ 確率論的な考え方が世の中に浸透していない
- ◆ 関係者（事業者、エネ庁殿、NRA殿）にPFMが十分に認知されていない。

# PFMの実用化に向けた活動（SCCの例）



## 電中研の取組み(原子炉圧力容器)

### ◆ 共有研究(電気事業者からの給付金で行う研究)

- 「PTS評価」や「100%検査の試験程度低減」に活用できる産業界側PFMコードとして、FERMATの開発とFAVORの改造を行う。
- 開発したコードを用いて「PTS評価」や「100%検査の試験程度低減」に向けた解析事例を蓄積する。
- PFM実活用検討会の運営

### ◆ エネ庁受託研究(原子力発電所の長期運転に向けた高経年化対策に関する研究開発、2021年～2025年度)

- 実施項目の一つとしてPFMの実用化に必要な技術基盤の整備を行う。
- PFMの現状と課題を明確化し、実用化に向けた活動計画、技術開発計画を立案する。(2022年度)
- 上記計画に従い、実用化に向けた活動、技術開発を行う(2023年度～2025年度)

## 電中研の取組み(配管・ノズル等)

### ◆ 共有研究

- 当所開発の配管系PFMコードPEDESTRIANの改造・検証を実施中。
- 入力パラメータとして重要なSCC進展速度の確率分布、溶接残留応力分布に関する実験的な検討を実施中。
- PFMに係る国際ベンチマーク解析プロジェクトへ参加し、米国を含む国外におけるPFMの規制動向や規格化について情報を把握。

### ◆ エネ庁受託研究(東北大からの再委託、2020年～)

- 原子力産業基盤強化事業委託費(人材育成事業)「軽水炉保全高度化を担う俯瞰的リスク評価能力と材料専門性を兼ね備えた技術者の育成」
- 事業者、プラントメーカ、研究機関、大学を対象に確率論的な考え方、PFMの基礎、SCCにPFMを適用する時の課題について、理解を深めてもらうことを目的に、講義、実験、解析自習を実施

## まとめ

- ◆ 当所では、PFMの実用化に向けて以下に取り組んでいく。
  - PFM活用方針の明確化
  - PFMに関する技術基盤の整備
  - PFM認知度の向上
- ◆ 原子炉圧力容器の照射脆化、並びに、配管/ノズル/炉内機器のSCCを対象として研究を進めている。
- ◆ 原子炉圧力容器については、従前より実施していた共有研究に加え、エネ庁殿の受託研究「原子力発電所の長期運転に向けた高経年化対策に関する研究開発、2021年～2025年度」の一項目としてPFMの実用化に向けた技術開発を2022年度より開始した。