



PFMの原子力分野への実活用に向けて － 基礎から最新動向まで － (第1部)

吉村 忍

(一社)日本溶接協会 原子力研究委員会 委員長／PFM小委員会 主査

**東京大学 名誉教授
大学院新領域創成科学研究科 産学協創推進室 副室長・特任教授**

*** 本講演は、PFM小委員会の活動の一環として、
日本におけるPFM技術の理解・普及促進を目的に、一般公開するものです。**

2025年5月20日

講演の流れ

第1部

1. 導入

- (1) 決定論的破壊力学と確率論的破壊力学の基本的考え方
- (2) 不確実さの扱い: 安全係数と破損確率の関係

2. PFMの基礎、特徴、メリット

第2部

3. 破損確率とリスク、安全とリスク、第1種リスクと第2種リスク

第3部

4. PFM解析コードの国内外の開発状況

5. 海外におけるPFMの実活用状況

6. 日本におけるPFMの実活用に向けた取組

7. 日本におけるPFMの実活用に向けて残された課題

8. まとめ

講演の流れ

第1部

1. 導入

- (1) 決定論的破壊力学と確率論的破壊力学の基本的考え方
- (2) 不確実さの扱い: 安全係数と破損確率の関係

2. PFMの基礎、特徴、メリット

第2部

3. 破損確率とリスク、安全とリスク、第1種リスクと第2種リスク

第3部

4. PFM解析コードの国内外の開発状況

5. 海外におけるPFMの実活用状況

6. 日本におけるPFMの実活用に向けた取組

7. 日本におけるPFMの実活用に向けて残された課題

8. まとめ

本資料の用語について

本資料で用いる用語	解説
不確実さ (uncertainty)	PFM(Probabilistic Fracture Mechanics)やPRA(Probabilistic Risk Assessment)では、偶然的不確実さ*や認識論的不確実さ**の両者を考慮して信頼度評価が行われる。本資料では、一般的に用いられることの多い「不確実性」や「バラツキ」等を「不確実さ」と表す。
亀裂(crack)	本資料では、破壊力学解析の対象である割れ等を「亀裂(crack)」と称する。一般的には「きず(flaw、defect)」、「欠陥(flaw、defect)」等と称される場合もある。
破損(failure)、 破損頻度	想定亀裂からの亀裂進展(crack initiation、crack extension)、亀裂貫通(crack penetration)、あるいはその両方は破壊(fracture)や破損(failure)と呼ばれるが、本資料では破損と称する。破損頻度は、亀裂進展頻度、亀裂貫通頻度、あるいはその両方を意味する。

p.16も参照

* 偶然的不確実さ: 物理量の偶然に支配される変動性を表す不確実さのこと。たとえば、荷重・材料強度・寸法等の物理量のばらつきが代表例。

** 認識論的不確実さ: 真の状態がよくわからず知識不足により生じる不確実さのこと。この不確実さはデータが蓄積されるにつれ、また、精度の高い理論が出現することにより、低減可能な性質を持つ。

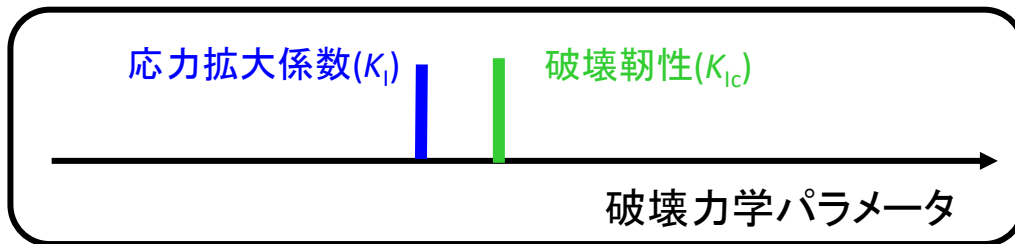
(参考) JEAG4640-2018等

(決定論的)破壊力学の基本的な考え方

破損のクライテリア (Criteria)

亀裂先端近傍の力学状態 $\geq$ 材料の破損に対する強度
→ 破損発生

亀裂先端近傍の力学状態 $<$ 材料の破損に対する強度
→ 破損は発生しない



吉村忍、笠原直人、高田毅士：東京大学工学教程シリーズ「材料力学I 7章 構造設計の考え方」、丸善出版、2023

吉村忍、笠原直人、高田毅士、他：同シリーズ「材料力学II 10章 材料強度論の基礎、13章 構造設計の基礎」、丸善出版、2023

吉村忍、笠原直人、他：同シリーズ「材料力学III 7章 材料強度論」、丸善出版、2023

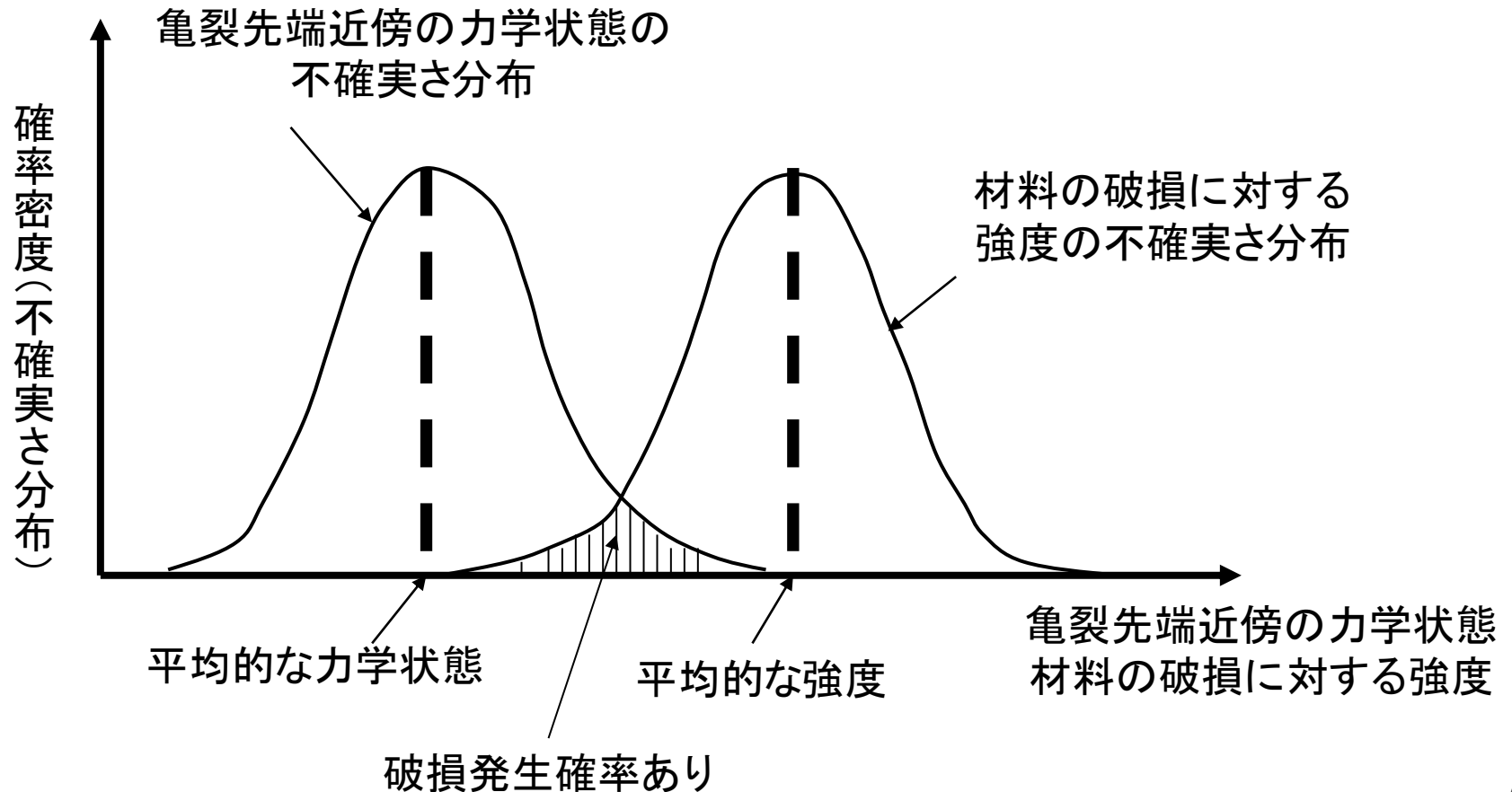
(決定論的)破壊力学の基本的な考え方

亀裂先端近傍の力学状態 $\geq$ 材料の破損に対する強度

亀裂先端近傍の力学状態 $<$ 材料の破損に対する強度

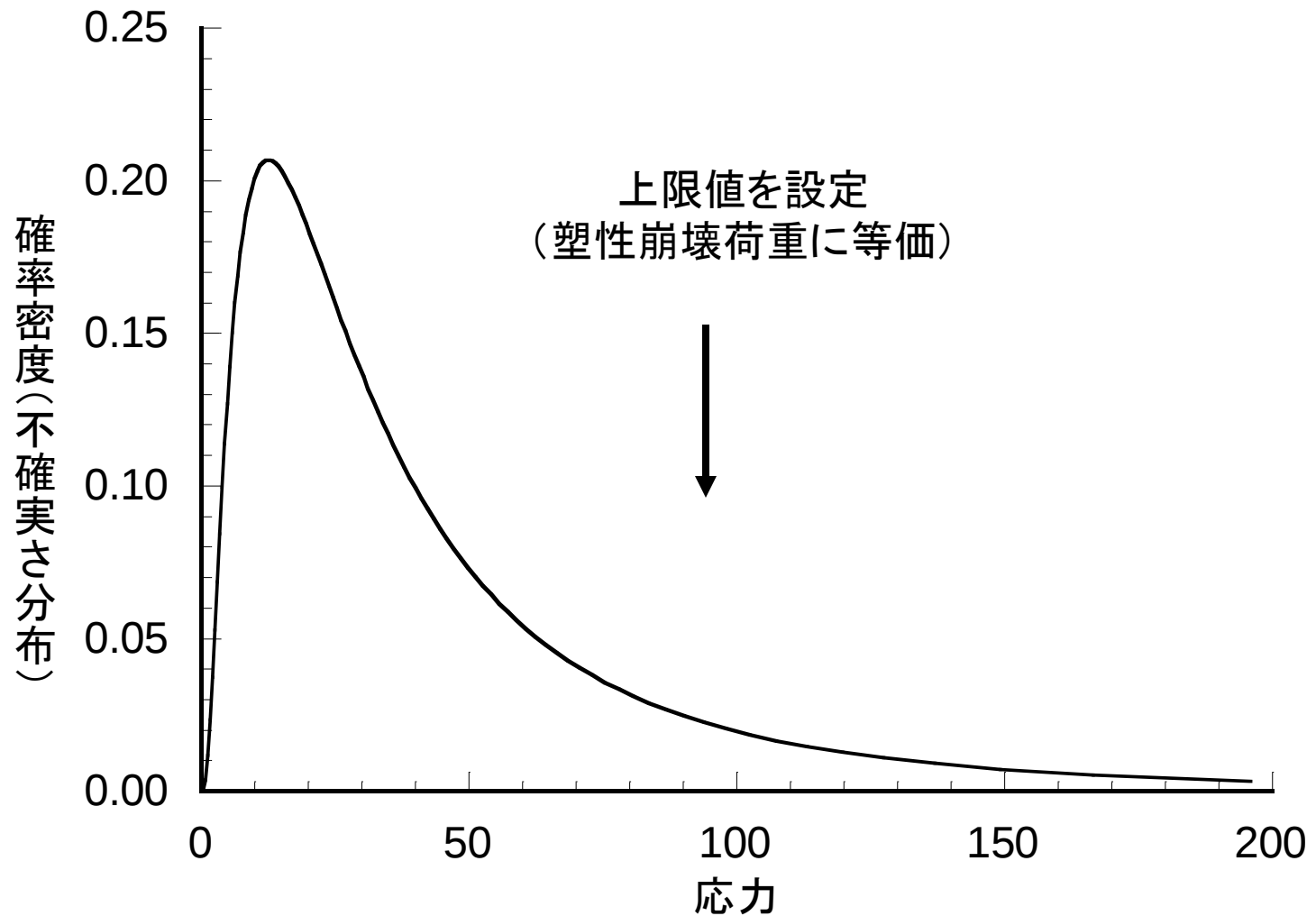
・・・ 様々な不確かさ

・・・ 様々な不確かさ



確率分布の例

地震時に配管に作用する応力の対数正規分布



決定論的アプローチにおける不確実さの扱い

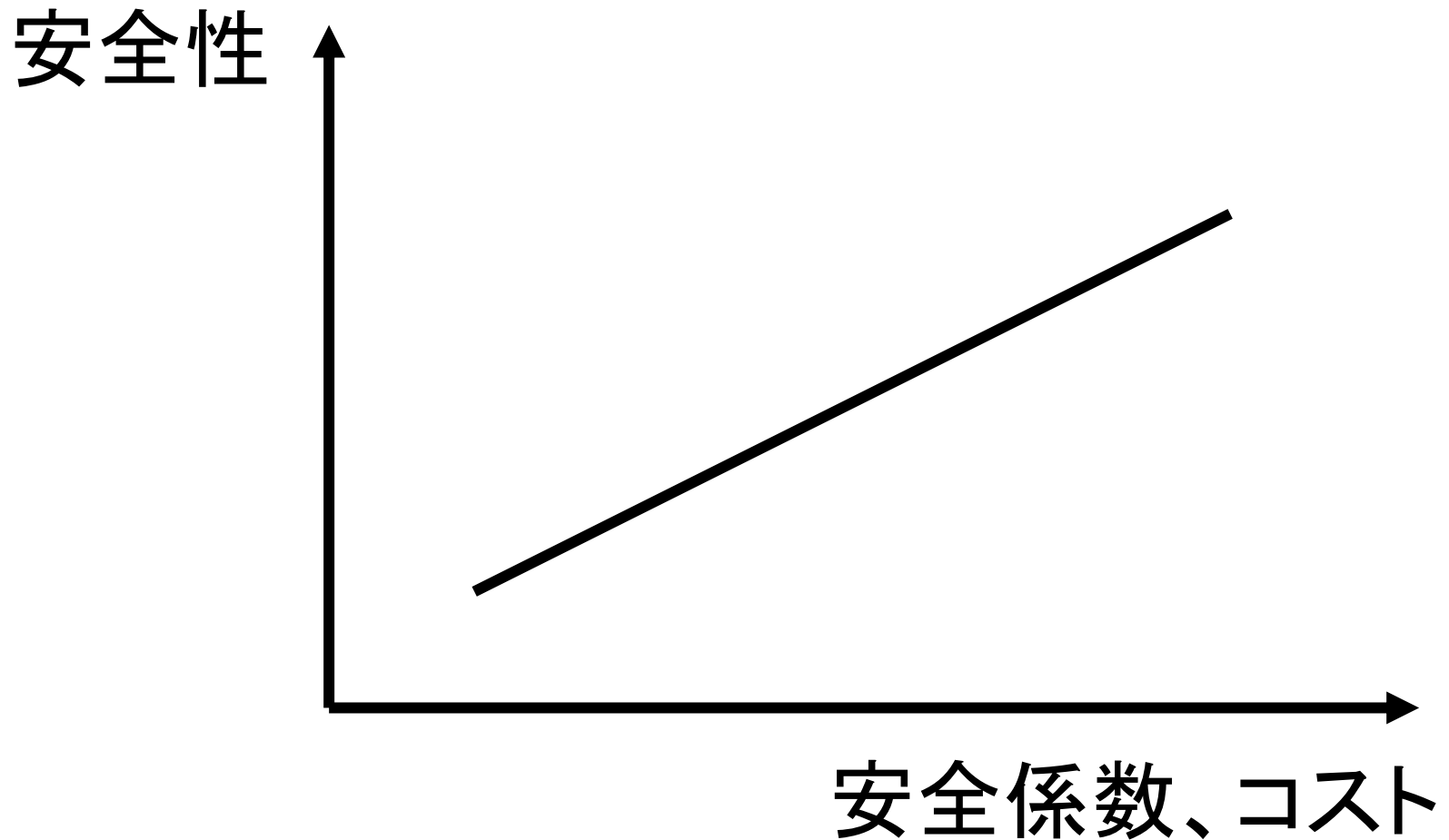
問題の不確実さを安全係数(Safety Factor)に転嫁

構造物中に発生する最大応力

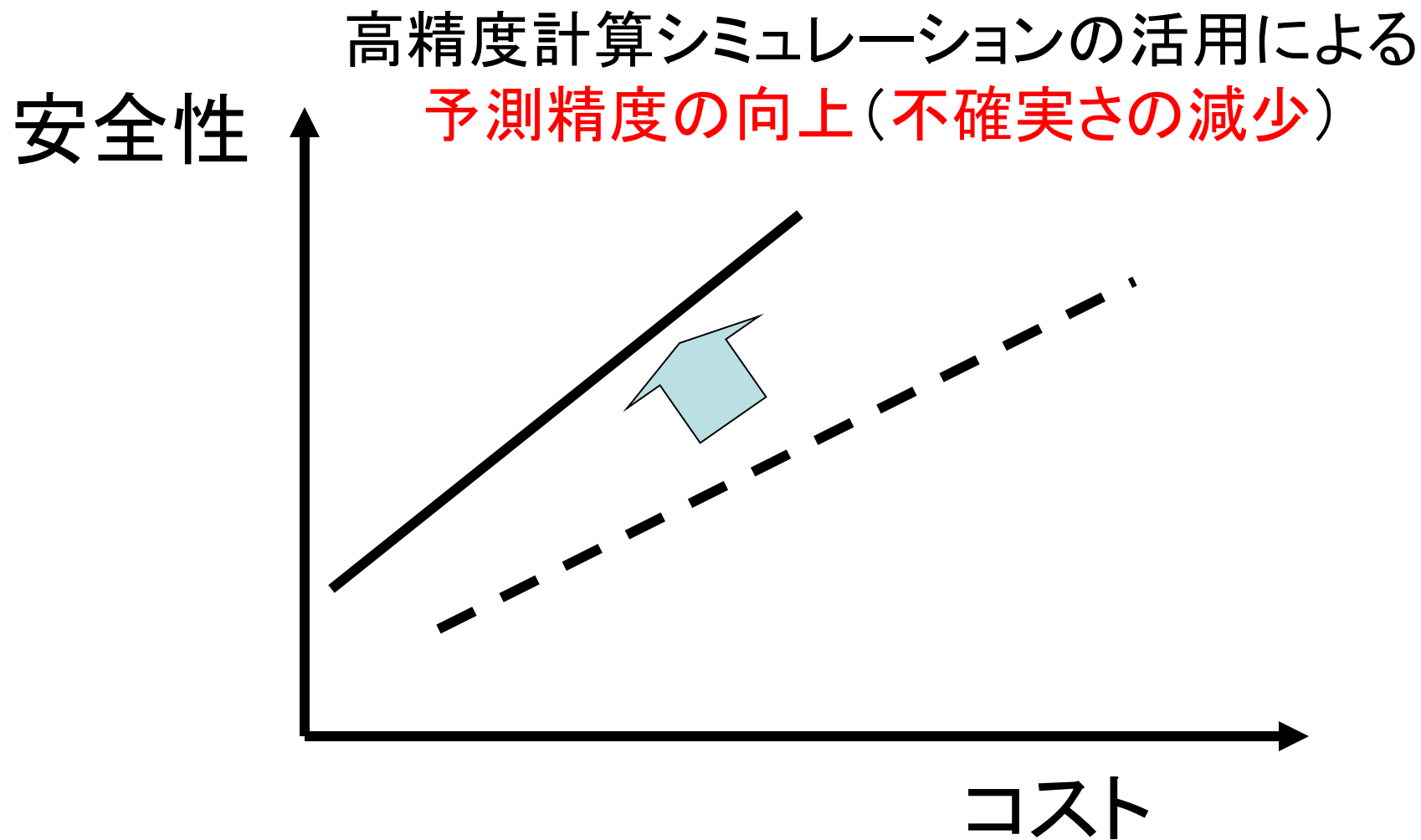
$$< \text{設計上許容される応力} = \frac{\text{材料の強度}}{\text{安全係数}}$$

安全係数(> 1)で強度を割引く

■ 安全性、安全係数とコスト



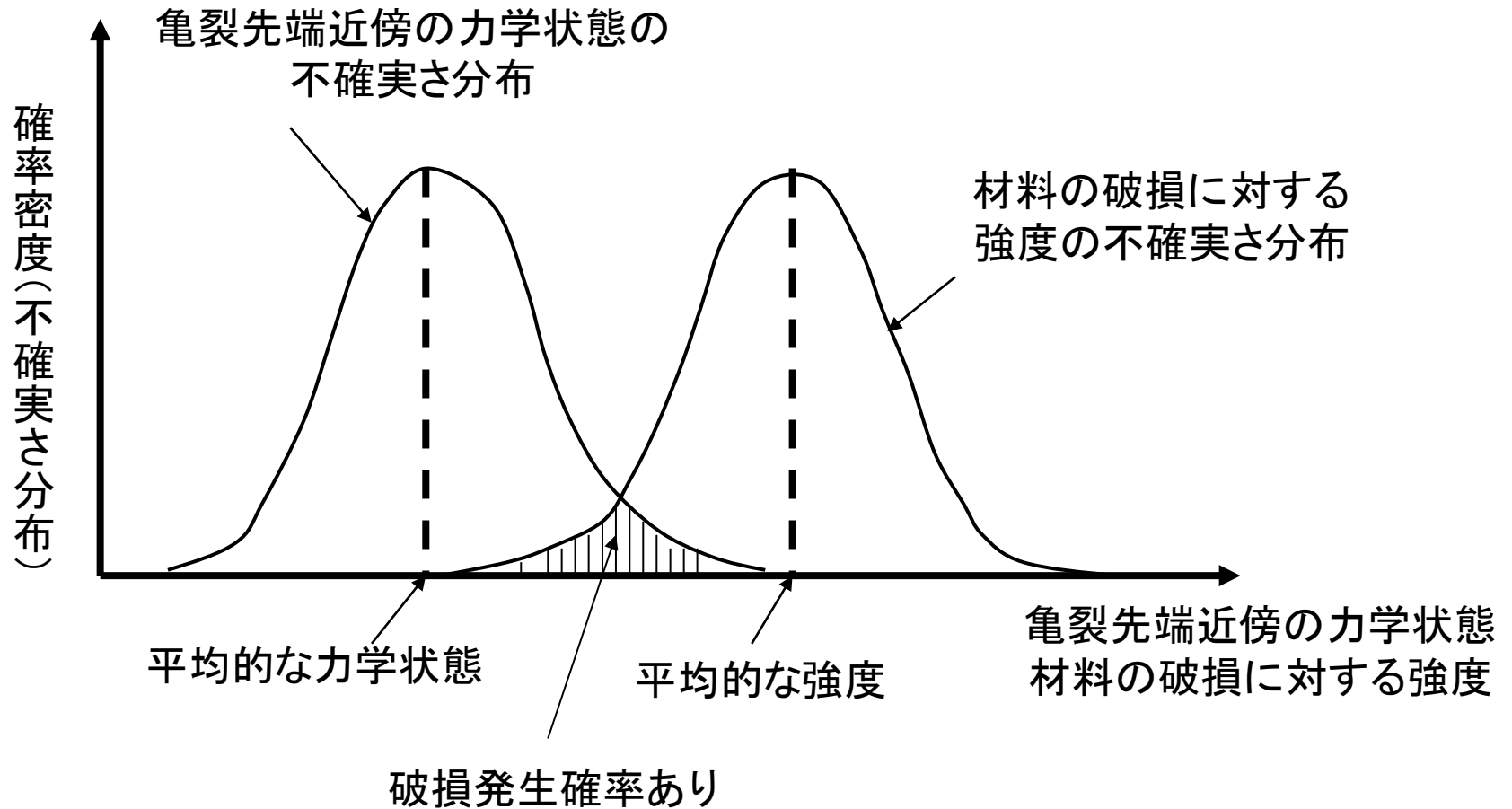
安全性とコスト



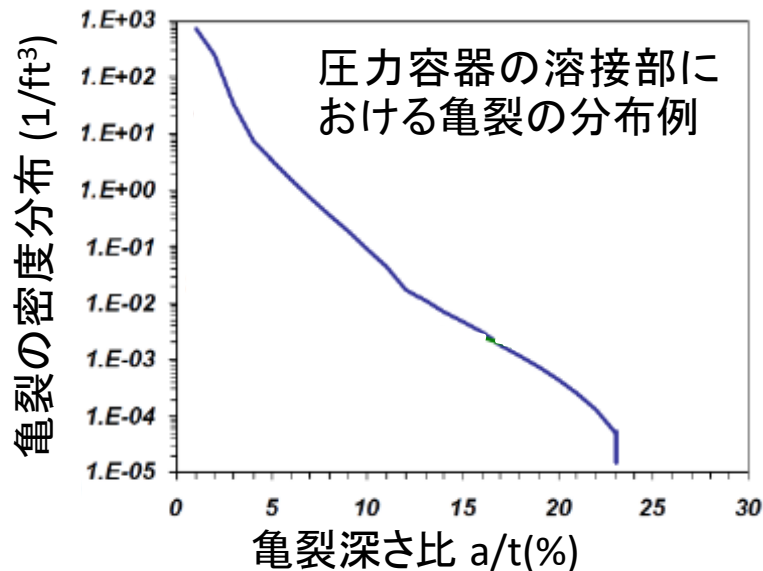


PFMの基礎、特徴、メリット

確率論的破壊力学(PFM: Probabilistic Fracture Mechanics)

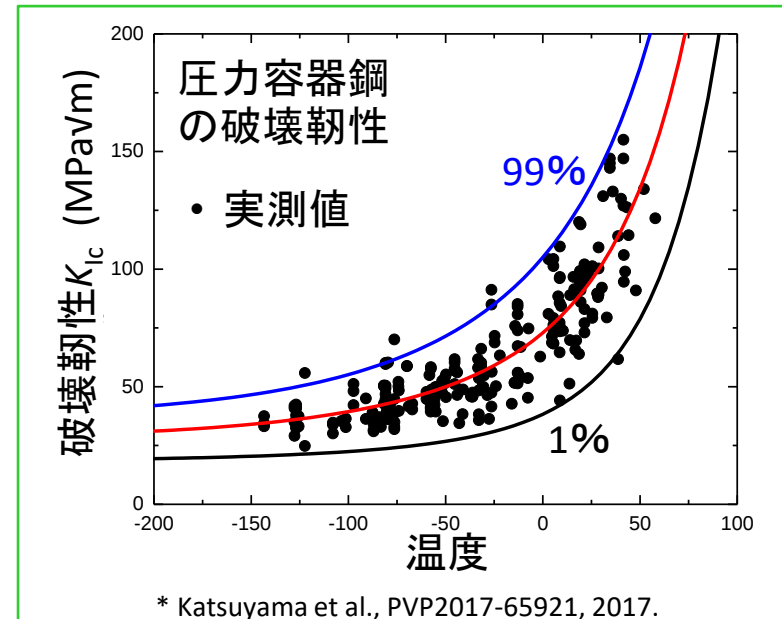


確率論的破壊力学(PFM)

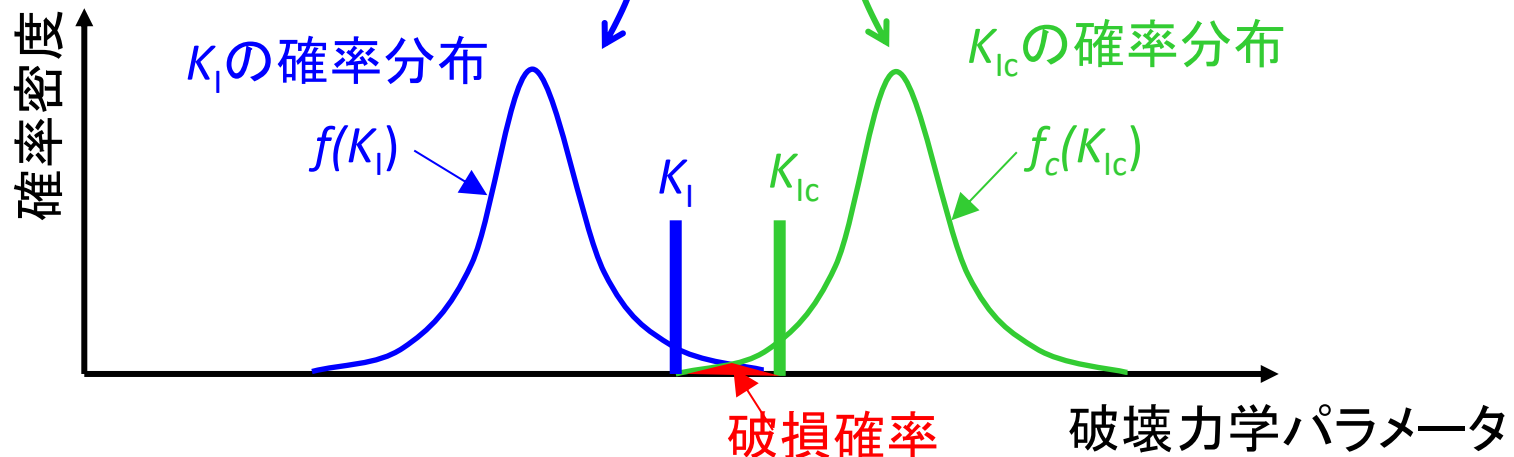


* Simonen, F.A., Schuster, G.J., Heasler, P.G., NUREG/CR-6817, 2004.

注 図中の大きな亀裂というのは、複数のブローホール(空洞)を1つにまとめて亀裂とみなしたものであり、進展性のない欠陥である



* Katsuyama et al., PVP2017-65921, 2017.



破損確率 (Failure Probability : P_f) の計算手法

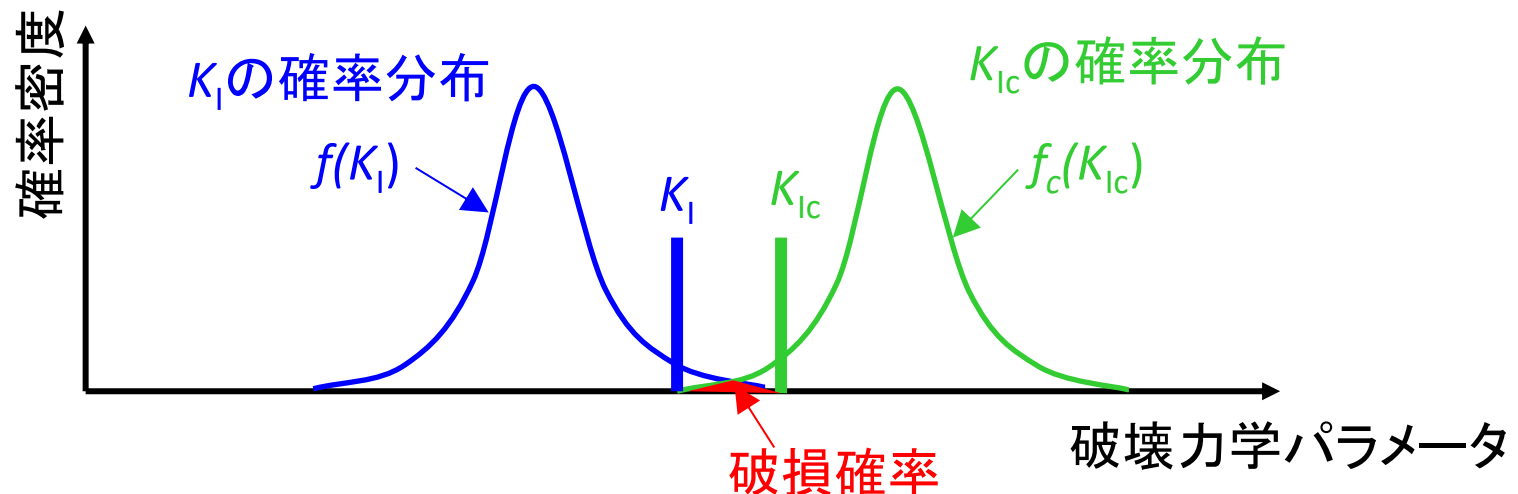
- モンテカルロ法: 確率分布を有する変数(確率変数)について、乱数を用いたシミュレーションを多数回行うことにより数値解を求める計算手法

$$P_f = \frac{n_f}{N} \quad \begin{array}{l} n_f: \text{破損に至るサンプリング数} \\ N: \text{全サンプリング数} \end{array}$$

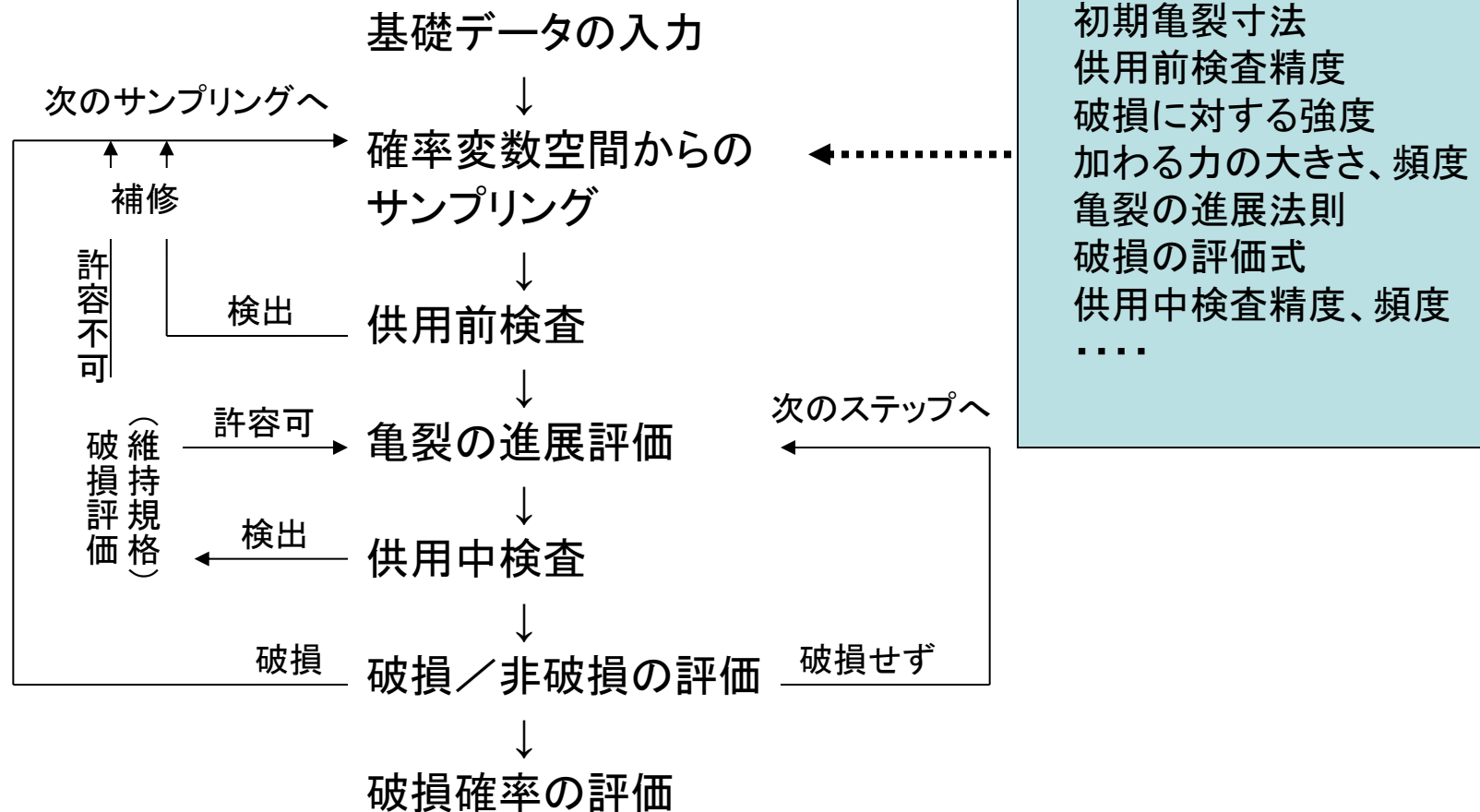
- 重み付きモンテカルロ法
- 階層別モンテカルロ法
- その他の手法

- 数値積分法:

$$P_f = \int_0^\infty \left\{ \int_{K_{Ic}}^\infty f(K_I) dK_I \right\} f_c(K_{Ic}) dK_{Ic}$$



PFM解析の標準的な流れ(モンテカルロ法)



偶然的な不確実さと認識論的な不確実さ

① 偶然的な不確実さ(Aleatory uncertainty)

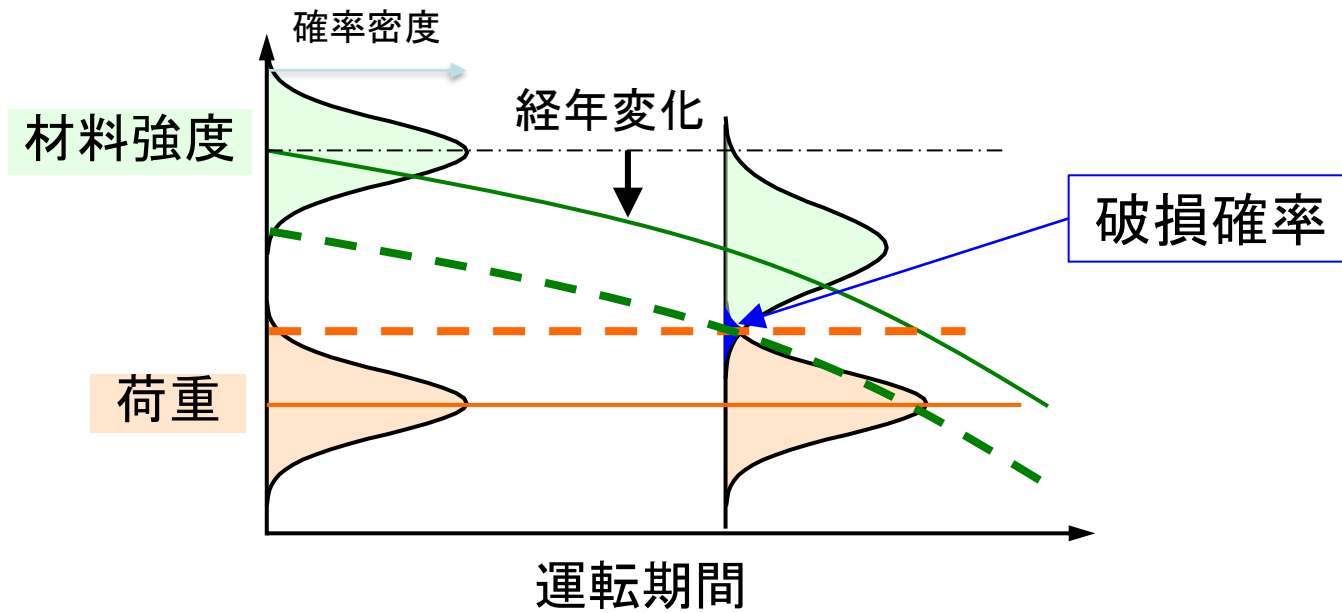
物理量の偶然に支配される変動性を表す不確実さのこと。たとえば、荷重・材料強度・寸法等の物理量のばらつきが代表例。

② 認識論的な不確実さ(Epistemic uncertainty)

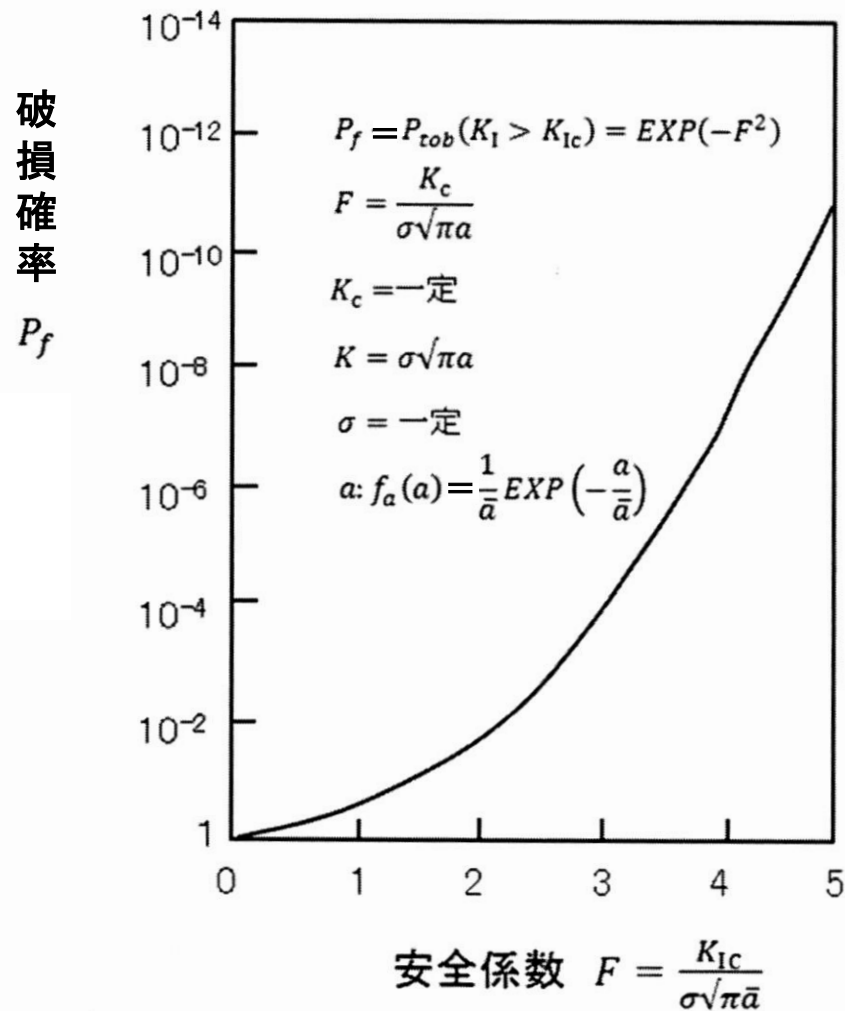
真の状態がよくわからず知識不足により生じる不確実さのこと。この不確実さはデータが蓄積されるにつれ、また、精度の高い理論が出現することにより低減可能な性質を持つ。

吉村忍、笠原直人、高田毅士、他： 東京大学工学教程シリーズ「材料力学Ⅱ 13章 構造設計の基礎」、丸善出版、2023

材料強度の経年変化と破損確率変化



破損確率と安全係数の関係の例

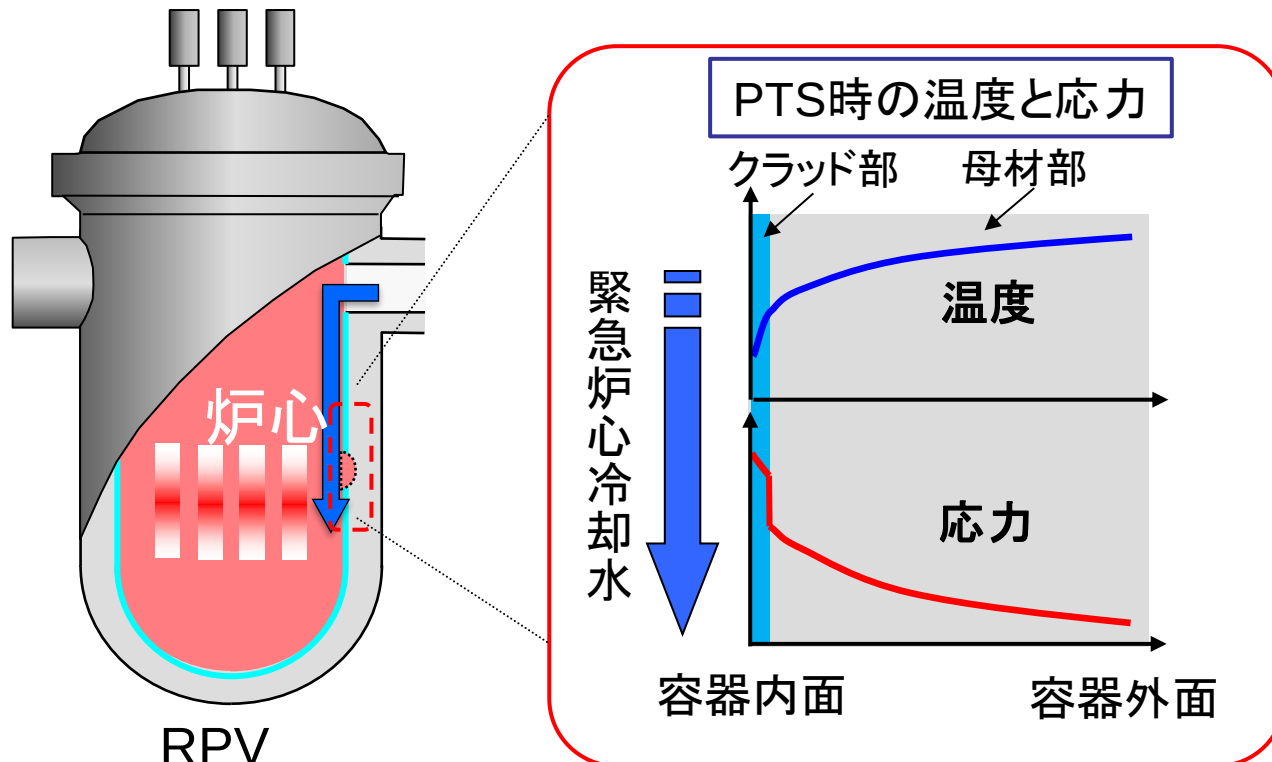


* き裂半長のみが指数分布を有する場合

加圧熱衝撃 (PTS: Pressurized Thermal Shock) 事象*1

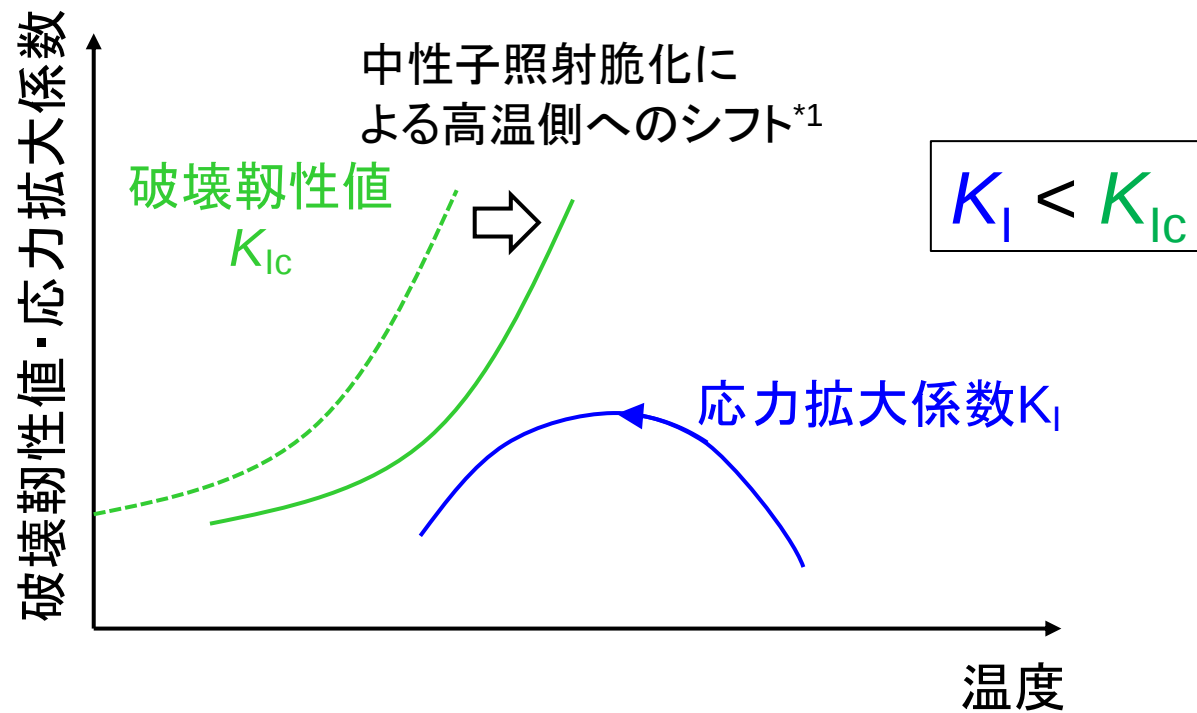
原子炉圧力バウンダリにおいて冷却材喪失事故が発生

- ➡ 原子炉圧力容器 (RPV) 内に緊急炉心冷却系 (ECCS) から冷水が注入
- ➡ 圧力がかかった状態で容器内部が急激に冷却
- ➡ 内圧による応力に加えて、容器板厚方向の温度差により内表面付近で引張応力 (熱応力) が発生
- ➡ また、温度の低下に伴い、破壊靱性も低下



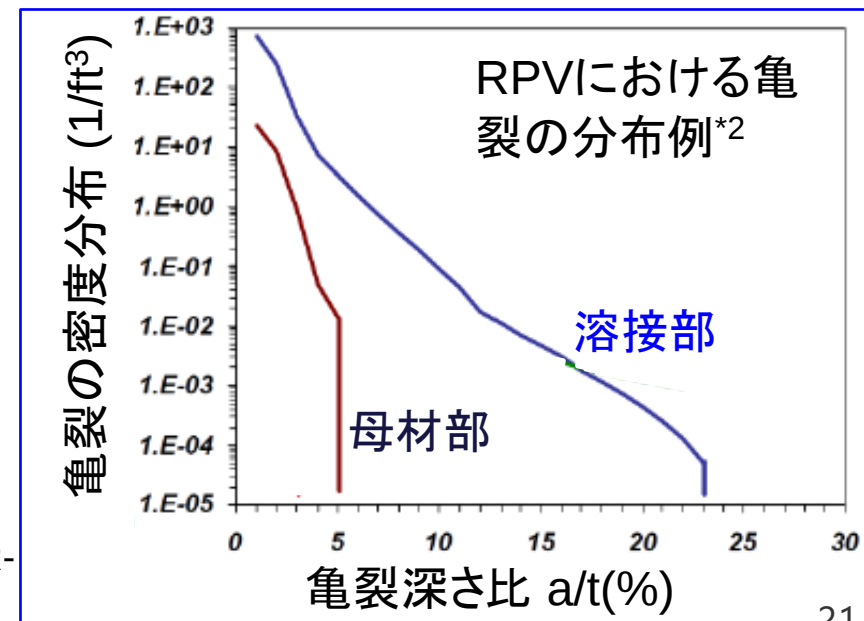
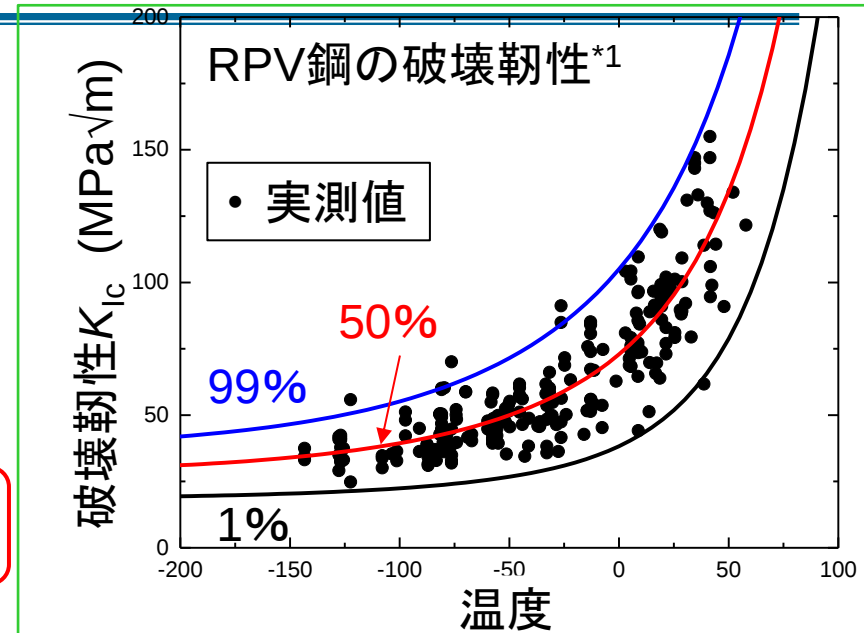
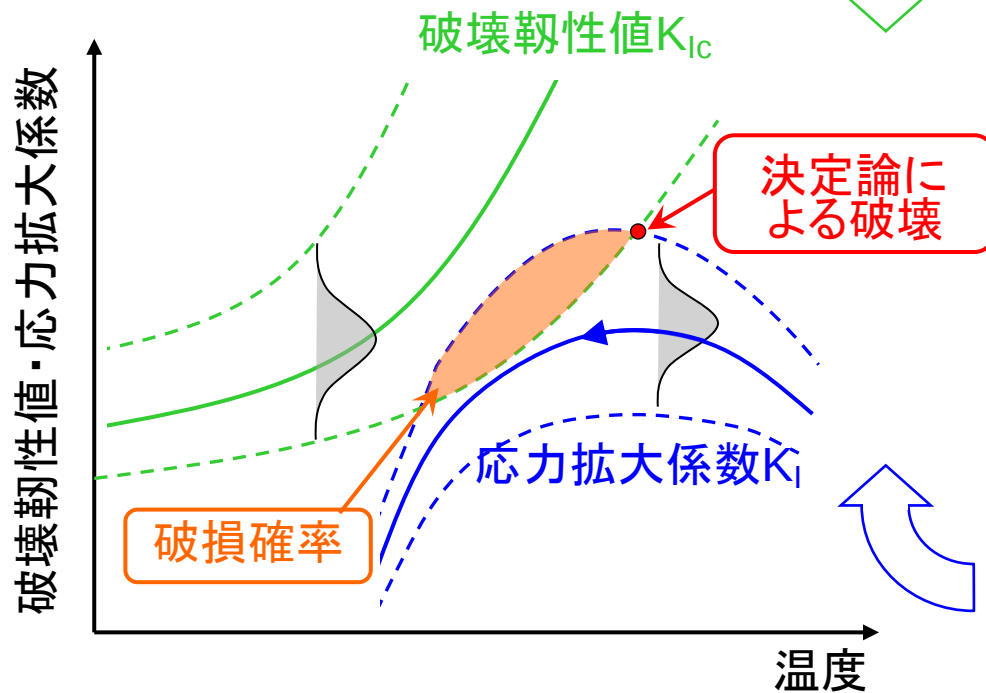
*1 PTS事象は、安全性評価において考慮しなくてはならない仮想的な事故時を対象とした事象であり、ここでは、具体的なPFM評価事例として取り上げる。

PTS事象時のRPVの決定論的健全性評価



*1 原子炉圧力容器用材料は、長期間の運転によって高い中性子照射量を受けると照射脆化によって、関連温度が上昇し、 K_{IC} 曲線が高温側へシフトする。

PTS事象時の破損確率評価



*1: Katsuyama et al., PVP2017-65921, 2017.

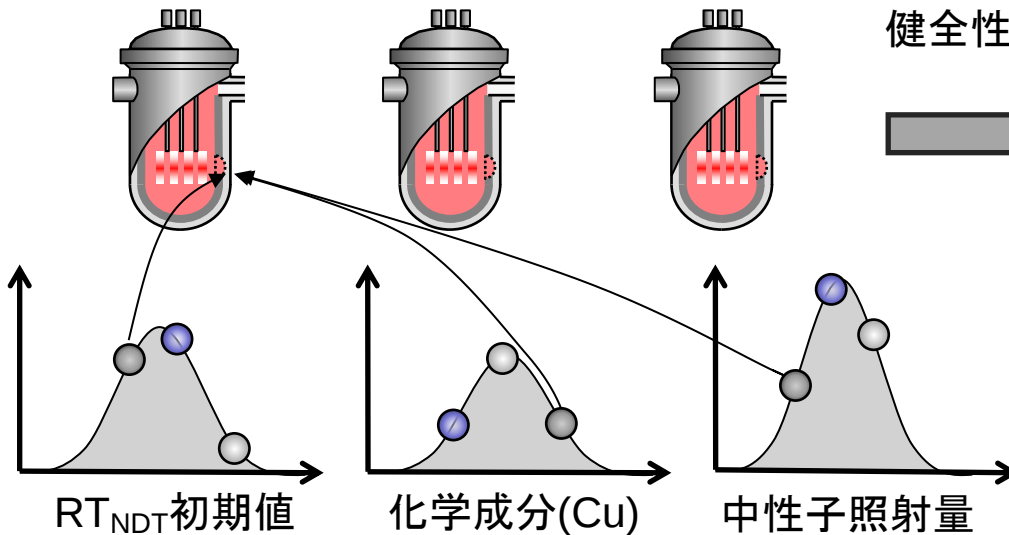
*2: Simonen, F.A., Schuster, G.J., Heasler, P.G., NUREG/CR-6817, 2004.

モンテカルロ法による破損確率計算のイメージ

●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RPVに対して
決定論的手法により、
健全性評価を行う

破損



影響因子とサンプリングイメージ

$$\text{破損確率: } P_f = \frac{n_f}{N}$$

n_f : 破損に至るサンプリング数
 N : 全サンプリング数

- 乱数を用いて、影響因子の確率分布を反映したRPVを多数サンプリングし、亀裂進展や板厚貫通等を考慮した破損評価を行う。
- 全サンプル数と破損に至るサンプル数の比から破損確率を算出する。
- RPVを対象とした主な破損確率:
 - ✓ 亀裂進展確率(CPI): $K_I \geq K_{Ic}$ の確率
 - ✓ 亀裂貫通確率(CPF): 亀裂の深さが板厚に達する確率

破損確率から破損頻度の評価

- 想定されるすべての過渡事象に対して、各過渡事象による破損確率に各事象の発生頻度を乗じ、想定した事象の分だけ破損確率の総和をとることにより、RPVの破損頻度(単位: 1/炉年[1ぱーろねん])を求めることができる。

$$\text{破損頻度} = \sum_{i=0}^n (\text{過渡事象の発生頻度} \times \text{過渡事象による破損確率})_i$$

- RPVを対象とした主な破損頻度:
 - 亀裂進展確率(CPI) ⇒ 亀裂進展頻度(FCI)
 - 亀裂貫通確率(CPF) ⇒ 亀裂貫通頻度(TWCF)
- 破損確率や破損頻度を数値指標とした確率論的健全性評価を期待できる。
- RPVのTWCFが炉心損傷頻度CDF(単位: 1/炉年[1ぱーろねん])に相当する数値指標であるため、PFM解析手法はリスク情報の活用においても、重要な評価技術である。既に米国等で、リスク情報を活用した検査などに実用されている。

CPI : Conditional Probability of Initiation

CDF: Core Damage Frequency

CPF : Conditional Probability of Fracture

FCI : Frequency of Crack Initiation

TWCF : Through Wall Crack Frequency

PFMの特徴、メリット

- **合理的評価:** 各因子の不確実さを確率密度分布で考慮でき、過度な保守性を排除できる。
- **定量的評価:** 破損確率や破損頻度を定量的評価でき、それらを用いて、許容クライテリアや安全裕度を定量的評価できる。
- **相互比較:** 定量化された破損確率や破損頻度を用いて、異なるコンポーネント間の比較、異なる規格・基準間の比較ができる。



PFMの原子力分野への実活用に向けて － 基礎から最新動向まで － (第2部)

吉村 忍

(一社)日本溶接協会 原子力研究委員会 委員長／PFM小委員会 主査

**東京大学 名誉教授
大学院新領域創成科学研究科 産学協創推進室 副室長・特任教授**

*** 本講演は、PFM小委員会の活動の一環として、
日本におけるPFM技術の理解・普及促進を目的に、一般公開するものです。**

2025年5月20日

講演の流れ

第1部

1. 導入

- (1) 決定論的破壊力学と確率論的破壊力学の基本的考え方
- (2) 不確実さの扱い: 安全係数と破損確率の関係

2. PFMの基礎、特徴、メリット

第2部

3. 破損確率とリスク、安全とリスク、第1種リスクと第2種リスク

第3部

4. PFM解析コードの国内外の開発状況

5. 海外におけるPFMの実活用状況

6. 日本におけるPFMの実活用に向けた取組

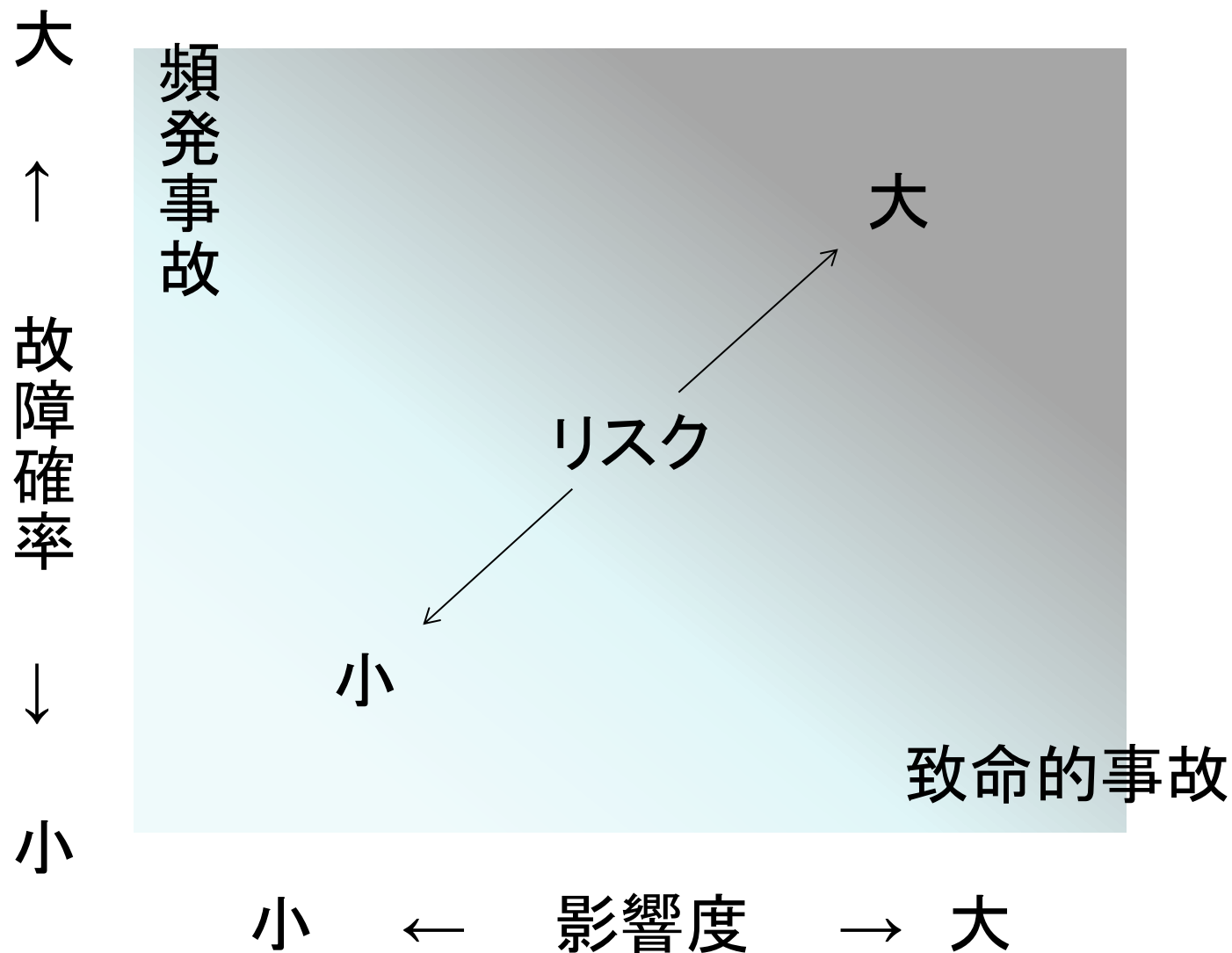
7. 日本におけるPFMの実活用に向けて残された課題

8. まとめ

リスク(Risk) = 破損確率あるいは故障頻度
(Probability / Likelihood)

× 破損あるいは故障の影響度
(Consequence)

リスクマトリックス



■安全とリスク(1)

「安全」か「安全でない」か …… 一般には2値論理的

「安全」ならば、何も追加の対応をとらない
(たとえば、安全宣言)

「安全でない」ならば、一切受け入れない

安全とリスク(2)

「リスク」ー「ベネフィット」

「コスト」ー「ベネフィット」

大きなリスク、小さなリスク

→ 常にリスクを小さくする努力をする

大きなベネフィット、小さなベネフィット

→ ベネフィットを大きくする努力をする

「ゼロリスク」 → それを一切行わない

「リスクをとる」 → リスクより大きなベネフィット
を得ようと行動する

安全とリスク(3)

一つの事柄に対する「リスク」と「ベネフィット」を比較する。

ケース1: リスクとベネフィットを受ける人が同一の場合 ➡ 比較的単純

ケース2: リスクとベネフィットを受ける人が異なる場合 ➡ 比較がなかなか困難

安全とリスク(4)

複数の事柄に対する「リスク」と「ベネフィット」を比較する。

たとえば、原子力エネルギーと再生可能エネルギーのリスクとベネフィットをどう考えるか？

それぞれのリスクを受ける人とベネフィットを受ける人の食い違い

➡ 科学的議論をベースとした、利害関係者を交えた丹念な議論・コミュニケーションが必要であり、それに基づく社会的合意形成が必須

安全とリスク(5)

リスクの**エンドポイント**(最終評価単位／基準)として、何を選択するか。

人命、環境、コスト、・・・

■ リスクの定量的評価法

確率論的リスク評価

PRA: Probabilistic Risk Assessment

確率論的安全評価

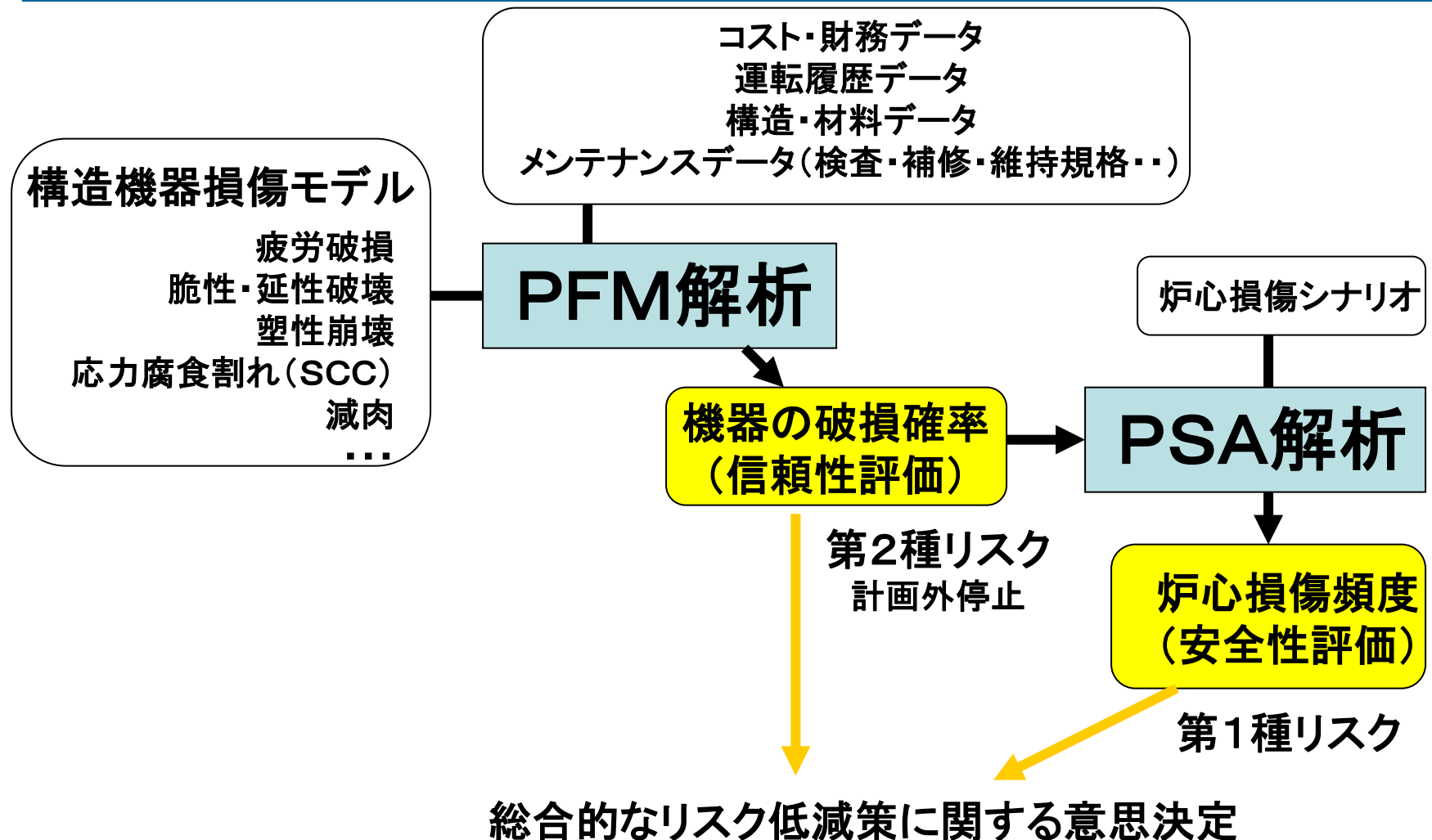
PSA: Probabilistic Safety Assessment

確率論的破壊力学

PFM: Probabilistic Fracture Mechanics

小林英男編著、「リスクベース工学の基礎」、内田老鶴園、2011

第1種リスクと第2種リスクに基づく総合的なリスク低減



注 圧力容器の損傷の厳しさは、壊れ方や位置、規模によって異なり、炉心損傷のリスクは、次の段階のPSA解析によって評価することになる



PFMの原子力分野への実活用に向けて － 基礎から最新動向まで － (第3部)

吉村 忍

(一社)日本溶接協会 原子力研究委員会 委員長／PFM小委員会 主査

**東京大学 名誉教授
大学院新領域創成科学研究科 産学協創推進室 副室長・特任教授**

*** 本講演は、PFM小委員会の活動の一環として、
日本におけるPFM技術の理解・普及促進を目的に、一般公開するものです。**

2025年5月20日

講演の流れ

第1部

1. 導入

- (1) 決定論的破壊力学と確率論的破壊力学の基本的考え方
- (2) 不確実さの扱い: 安全係数と破損確率の関係

2. PFMの基礎、特徴、メリット

第2部

3. 破損確率とリスク、安全とリスク、第1種リスクと第2種リスク

第3部

4. PFM解析コードの国内外の開発状況

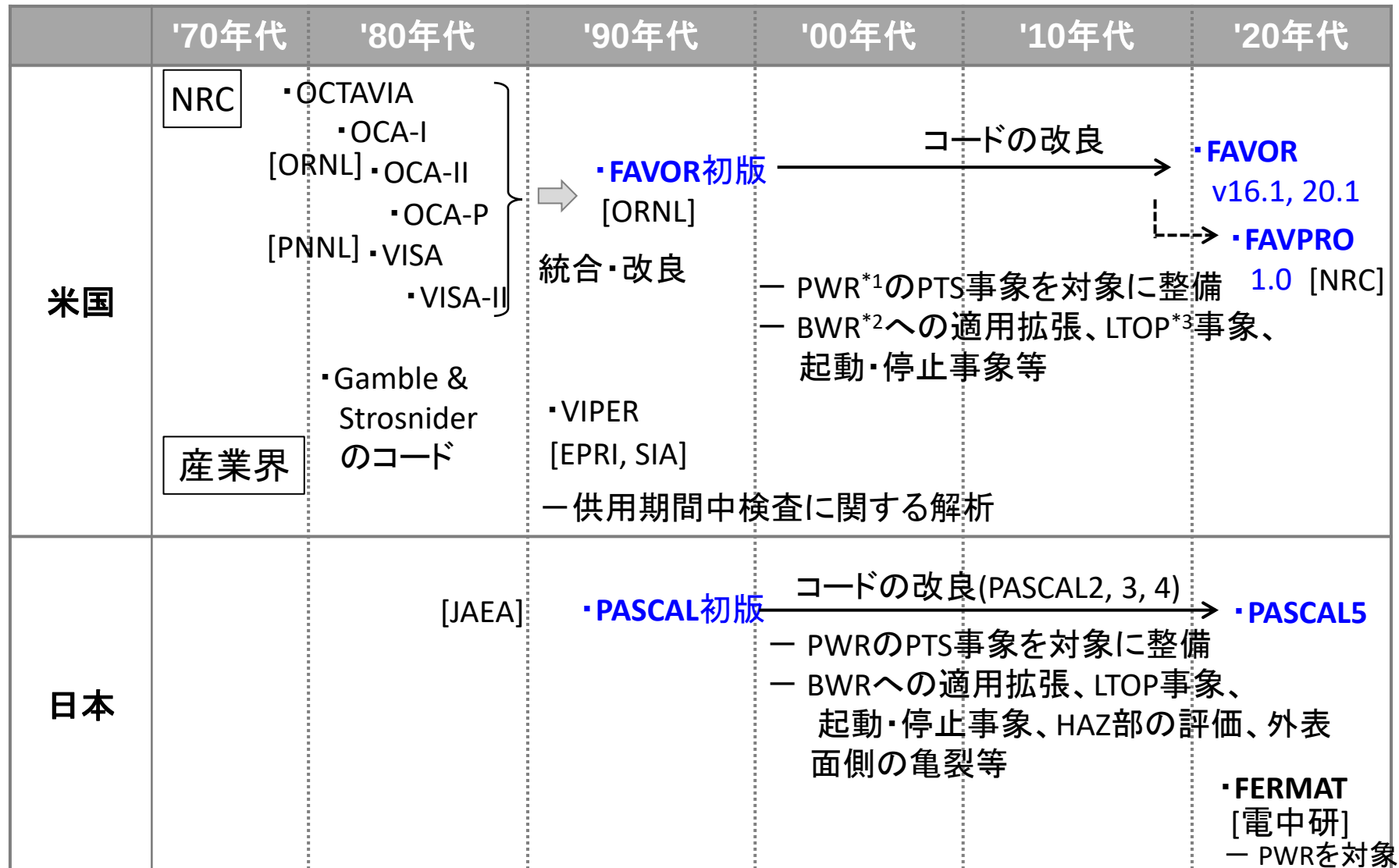
5. 海外におけるPFMの実活用状況

6. 日本におけるPFMの実活用に向けた取組

7. 日本におけるPFMの実活用に向けて残された課題

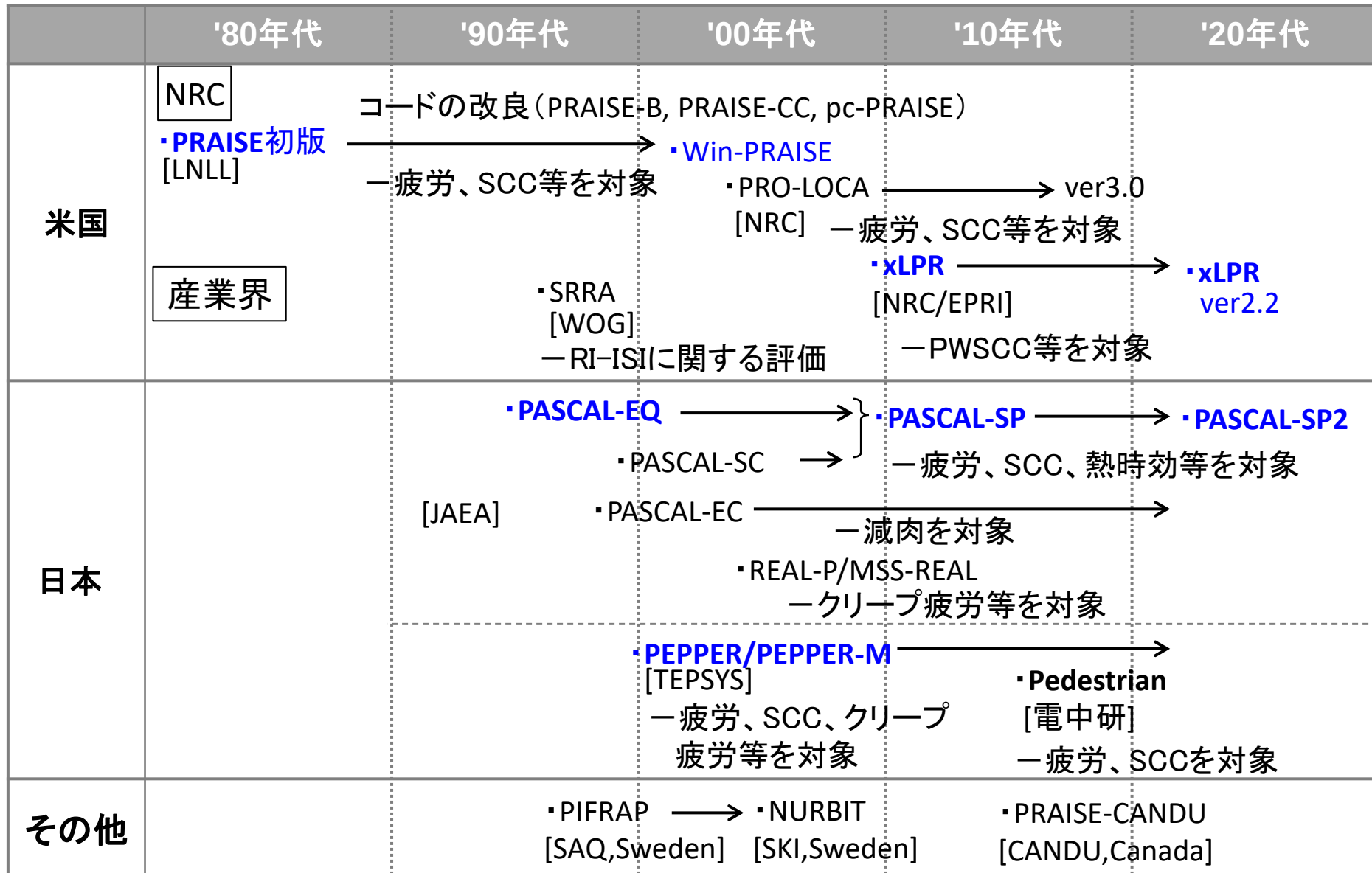
8. まとめ

RPVを対象としたPFM解析コードの開発



*¹PWR: 加圧水型原子炉, *²BWR: 沸騰水型原子炉, *³LTOP: 低温過圧

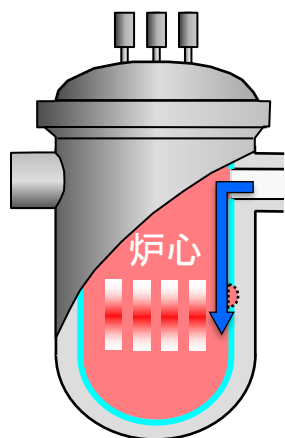
配管を対象としたPFM解析コードの開発



JAEAのPFM解析コード:PASCALシリーズ

- JAEAでは、国内軽水炉機器の確率論的健全性評価に関する研究の一環として、PFM解析コードPASCAL*シリーズの開発等を進めている。

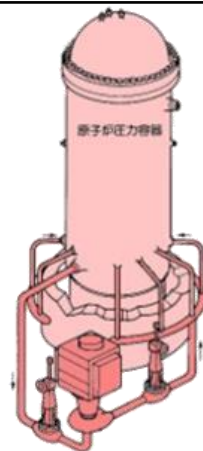
*PASCAL: **P**FM **A**nalysis for **S**tructural **C**omponents in **A**ging **L**WR



PASCAL5

RPVの中性子照射脆化を考慮した破損確率解析コード

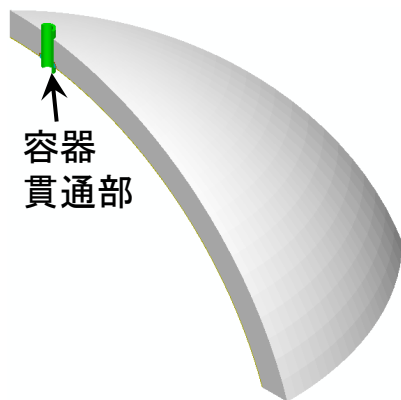
高見澤 悠 他, "原子炉压力容器用確率論的破壊力学解析コードPASCAL5の使用手引き及び解析手法", JAEA-Data/Code 2022-006, 2023



PASCAL-SP2

圧力バウンダリ配管の応力腐食割れ(IGSCC, PWSCC, NiSCC)、疲労や熱時効等を考慮した破損確率解析コード

山口 義仁 他, "原子炉配管に対する確率論的破壊力学解析コードPASCAL-SP2の使用手引き及び解析手法(受託研究)" JAEA-Data/Code 2020-021, 2021



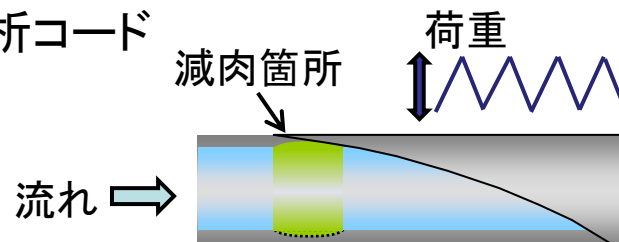
PASCAL-NP

容器貫通部等の複雑形状部位におけるNi合金溶接部のSCC等に対する破損確率解析コード

宇田川 誠 他, "Ni基合金異材溶接部に対する確率論的破壊力学解析コードPASCAL-NPの使用手引き", JAEA-Data/Code 2013-013, 2013

PASCAL-EC

炭素鋼配管の減肉に関する破損確率解析コード



伊藤 裕人 他, "減肉配管構造信頼性解析コードPASCAL-ECの使用手引き", JAEA-Data/Code 2006-001, 2006

RPVを対象としたPFM解析コードに係る取組

PFM解析手法・モデル及び解析コードの整備

- ・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

➡ PASCAL5

PFM解析コードのV&V(Verification & Validation)

- ・RPVやPFMの専門家で構成される専門部会の設立、PASCALのV&V
- ・PASCAL 信頼性向上ワーキンググループの設立、PASCALのV&V
- ・国内や国際ラウンドロビン解析、ベンチマーク解析の実施

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

PFMの活用方策に関する検討

- ・数値指標(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

海外におけるPFMの実活用状況

国	評価対象	検討内容	許容基準・結論等	実施機関 ¹⁾	解析コード	関連文献
米国	RPV	RPVのPTS評価における参照温度のスクリーニング基準の設定	PFM解析により得られるTWCFを基に、許容基準 1×10^{-6} /炉年[NRC NUREG-1874]を満足する関連温度に関するスクリーニング基準を規定	規	FAVOR	10CFR50.61a
		BWRのRPVの耐圧部分の溶接継手に対する試験程度の低減	試験程度を100%から0%に低減した場合のTWCFが以下の許容基準に比べて小さいことを示した。その結果、周方向継手の試験が免除された。 ・ 5×10^{-6} /炉年 [NRC RG1.154] ・CDF ^注 $<10^{-4}$ /炉年[NRC RG1.174] ・LERF ^注 $<10^{-5}$ /炉年 [NRC RG1.174]	事・規	VIPER/ FAVOR	BWRVIP-05, NRC safety evaluation report (98-332A)
		PWRのRPVの耐圧部分の溶接継手に対する検査間隔の延長	検査間隔を10年から20年に延長した場合のTWCFが以下の許容基準に比べて小さいことを示した。その結果、検査間隔20年への延長が認められた。 ・ Δ CDF ^注 $<1 \times 10^{-6}$ /炉年 ・ Δ LERF ^注 $<1 \times 10^{-7}$ /炉年 [NRC RG1.174]	事・規	FAVOR	WCAP-16168-NP-A

1) 実施機関:規・・・規制側主体の取組、事・・・事業者側主体の取組、規・事・・・規制側と事業者側と共同の取組

注: CDF:炉心損傷頻度、LERF:早期大規模放出頻度、

Δ CDF:炉心損傷頻度の変化量、 Δ LERF:早期大規模放出頻度の変化量

海外におけるPFMの実活用状況

国	評価対象	検討内容	許容基準・結論等	実施機関 ¹⁾	解析コード	関連文献
米国	RPV	PWRのRPVに対する水素白点の影響評価	ベルギーで水素白点が見つかったことを踏まえ、水素白点を考慮した場合のTWCFを評価し、 1×10^{-6} /炉年[NRC NUREG-1874] に比べて小さいことを確認。	事	FAVOR	EPRI MRP-367
		PWRのRPV鍛造材における炭素偏析の影響評価	フランスのRPV等で炭素偏析が確認されたことを踏まえ、炭素偏析を考慮した場合のTWCFが許容基準 1×10^{-6} /炉年[NRC NUREG-1874] に比べて小さいことを確認。	事	FAVOR	EPRI MRP-417
		リスク情報を活用した圧力-温度制限の提案	BWR及びPWRのRPVに対するPFMに基づく感度解析を通じて、許容基準 2×10^{-7} /炉年を満足する圧力-温度制限を提案。	事	FAVOR	MRP-250 & BWRVIP-215NP
	配管	配管を対象とした供用期間中検査(RI-ISI)に関する検討	実プラントに対するPFM解析を通じて配管に対するRI-ISIの適用性が検討され、検査のコスト削減、保全プログラムの策定、リスク情報に基づく意思決定等に有用であることが示された。	事・規	SRRA	WCAP-14572 revision 1-NP-A

海外におけるPFMの実活用状況

国	評価対象	検討内容	許容基準・結論等	実施機関	解析コード	関連文献
米国	管台	BWRのRPV管台溶接継手及び管台内面の丸み部における試験程度の低減	試験程度を100%から25%に低減した場合のTWCFが許容基準 5×10^{-6} /炉年[NRC RG1.154]に比べて小さいことを示した。その結果、試験程度の低減が認められた。	事・規	VIPER-NOZZLE	BWRVIP-108-NP
		PWRのRPV管台溶接継手における検査間隔の延長	検査間隔を10年から20年に延長した場合のTWCFが以下の許容基準に比べて小さいことを示した。その結果、検査間隔20年への延長が認められた。 ・$\Delta CDF < 1 \times 10^{-6}$/炉年 ・$\Delta LERF < 1 \times 10^{-7}$/炉年 [NRC RG1.174]	事・規	SRRA	WCAP-17236-NP-A revision 0

海外におけるPFMの実活用状況

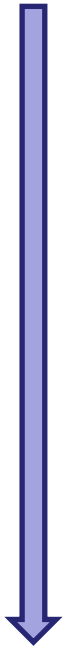
国	評価対象	検討内容	許容基準・結論等	実施機関	解析コード	関連文献
ベルギー	RPV	Doel3号機とTihange2号機で確認された水素白点の影響評価	検出された水素白点を亀裂と見なしてPFM解析を行い、FCIは許容基準 1×10^{-6} /炉年 [NRC NUREG-1874] に比べて小さいことを示した。	規	FAVOR	Doel3 & Tihange2 RPV evaluation report
カナダ	圧力管	CANDU炉における経年劣化した圧力管の破損頻度に対する許容基準の検討	国内外における確率論的数値指標に係る許容基準について調査を行い、圧力管の破損頻度の許容基準を検討。	規	PRAISE-CANDU	PVP2015(tutorial document), PVP2016-63655
スウェーデン	配管	配管におけるLBBの確率論的評価やWOG法に基づくRI-ISIに関する評価等を実施	PFMに基づく配管の破損頻度評価の規制への適用を検討。	規	NURBIT	Regulatory Information Conference 2016
その他*	・スペイン、ブルガリア等では、WOG法に基づくRI-ISI評価が行われている。 ・スイス、台湾等において、RPVに対する破損確率や頻度評価の解析事例が報告されている。					

*: Canadian Nuclear Safety Commission, “Third party review of PRAISE-CANDU probabilistic fracture mechanics code”, RSP-0306, 2015.

米国におけるRPVの確率論的健全性評価:RPVのPTS規則

PFMコード

FAVOR v04.1



FAVOR v06.1

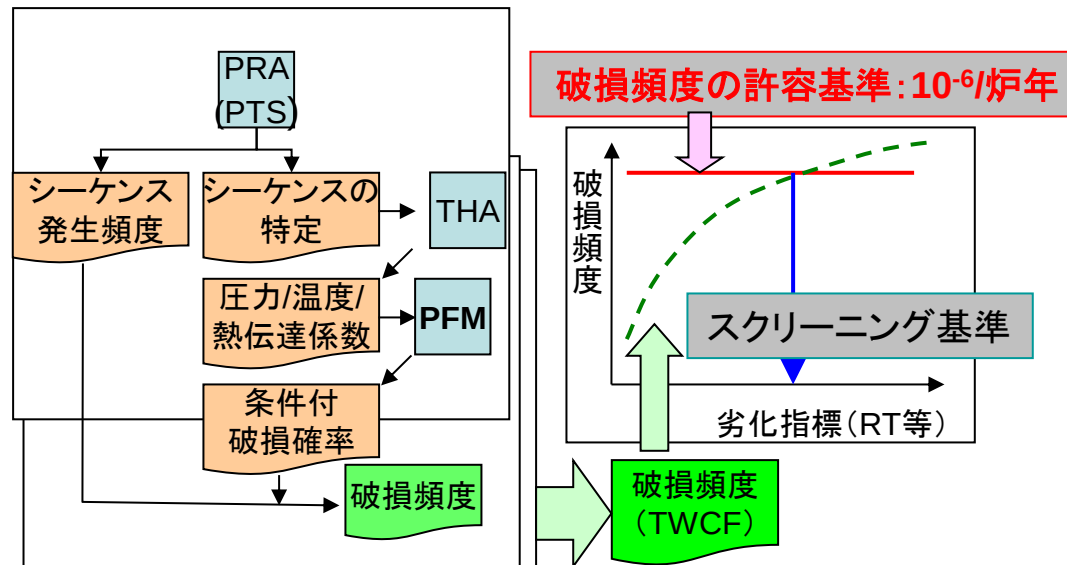


FAVOR v20.1

NRCのプロジェクト

NUREG-1806(米国PTS再評価プロジェクト,2006)

- 最新の破壊力学等の知見を基に、PFM解析を適用したスクリーニング基準の技術的根拠を検討(5カ年)

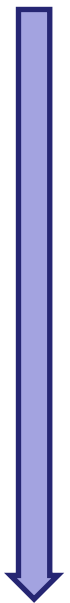


NUREG-1874(PTSスクリーニング基準の作成,2007)

- NUREG1806の結果をレビュー、解析条件を再検討した上で、TWCFを再評価し、PTSスクリーニング基準を作成

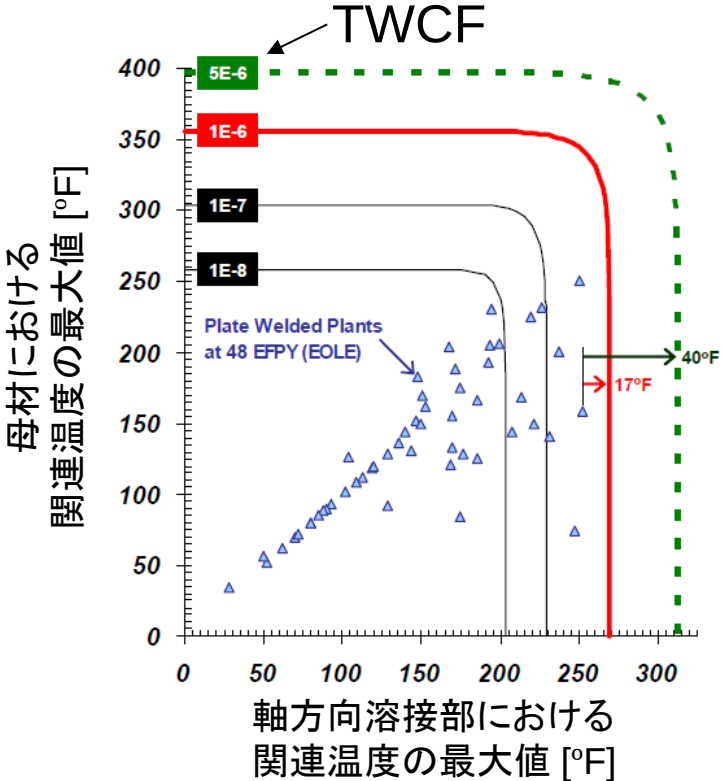
PTS規則

10CFR50.61
(1984)



10CFR50.61a
(2010)

(2021) 注 10CFR50.61aは、10CFR50.61の代替規則として新たに規定されたものであり、10CFR50.61も現在有効である。



出典: NRC, NUREG-1874 (2007)

- 出典：NRC, ML15209A791

- 47

BWRのRPVの耐圧部分の溶接継手に対する試験程度の検討事例

- BWRVIP^{*1}が、PFM評価結果を基にRPVにおける耐圧部分の溶接継手に対する試験程度の低減を提案^{*2}
- それを受けてNRCは独自にPFM評価を行い、その妥当性を検討。

項目	内容
検討内容	10CFR50.55aで要求されていた100%の試験程度に対する緩和
検討対象部位	BWRのRPVにおける耐圧部分の溶接継手
PFM評価の対象部位	BWRのRPVにおける炉心領域の溶接継手
対象とした経年劣化	中性子照射脆化
考慮された事象	設計基準事象、低温過圧事象
評価に用いられた許容基準	・ PWRにおけるRPVのPTS事象による破損頻度に関する許容基準(当時)を準用: $<5 \times 10^{-6}$/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]

*1 BWRVIP: BWR Vessel and Internals Project

*2 BWRVIP-05

BWRのRPVの耐圧部分の溶接継手に対する試験程度の検討事例

- 周方向溶接継手に対する検討経緯と評価結果を下表に示す。

西暦	検討者	内容
1995年	BWRVIP	設計基準事象を考慮した場合の破損頻度を 2.2×10^{-41} /炉年と算出し、試験程度を0%に軽減することを提案。
1997年	NRC	海外の米国製のBWRでLTOP事象が発生したことを踏まえ、PFM評価ではLTOP事象を考慮すべきとBWRVIPに要求。
1997年	BWRVIP	LTOP事象を考慮し、 $CPF=1 \times 10^{-6}$ 、破損頻度 $=9 \times 10^{-10}$ /炉年と算出された結果を踏まえ、試験程度を0%に軽減することを提案。
1998年	NRC	• $CPF=8.2 \times 10^{-5}$、破損頻度$=8.2 \times 10^{-8}$/炉年と算出。破損頻度はRG1.154の基準値より低く、CDF及びLERFに対するRG1.174の許容基準に比べて低いことを確認。 • BWRVIPの提案は許容できると結論付けた。

- 軸方向溶接継手に対しては、BWRVIPは、PFM評価の結果を踏まえて試験程度50%への軽減を提案したが、NRCは、深層防護等の観点から基本的に全ての範囲の非破壊試験が必要であると判断した。

PWRのRPVの耐圧部分の溶接継手に対する検査間隔の検討事例

- PWROG*は、PFM評価により検査間隔を10年から20年に変更した場合、RPVの破損頻度の変化量は許容基準に比べて低いこと等を示し、検査間隔の延長に関する技術的根拠をNRCに提出した。
- NRCは、PWROGの評価に用いた条件等が妥当であることを確認し、PWROGの提案を許容できるとした。

*PWROG: PWR Owners Group

項目	内容
検討内容	RPVの溶接継手に対する検査間隔の延長
検討対象部位	PWRのRPVの耐圧部分の溶接継手及び容器に完全溶込み溶接されたノズルの溶接継手(ASME Code Section XIのカテゴリB-A及びB-D)
PFM評価の対象部位	PWRのRPVにおける炉心領域の溶接継手
対象プラント	Beaver Valley Unit 1、Palisades、Oconee Unit 1
対象とした経年劣化	中性子照射脆化、疲労亀裂進展
考慮された事象	加圧熱衝撃事象
評価に用いられた許容基準	・ CDFの変化量(ΔCDF): $<10^{-6}$ /炉年 [NRC RG1.174] ・ LERFの変化量($\Delta LERF$): $<10^{-7}$ /炉年 [NRC RG1.174]

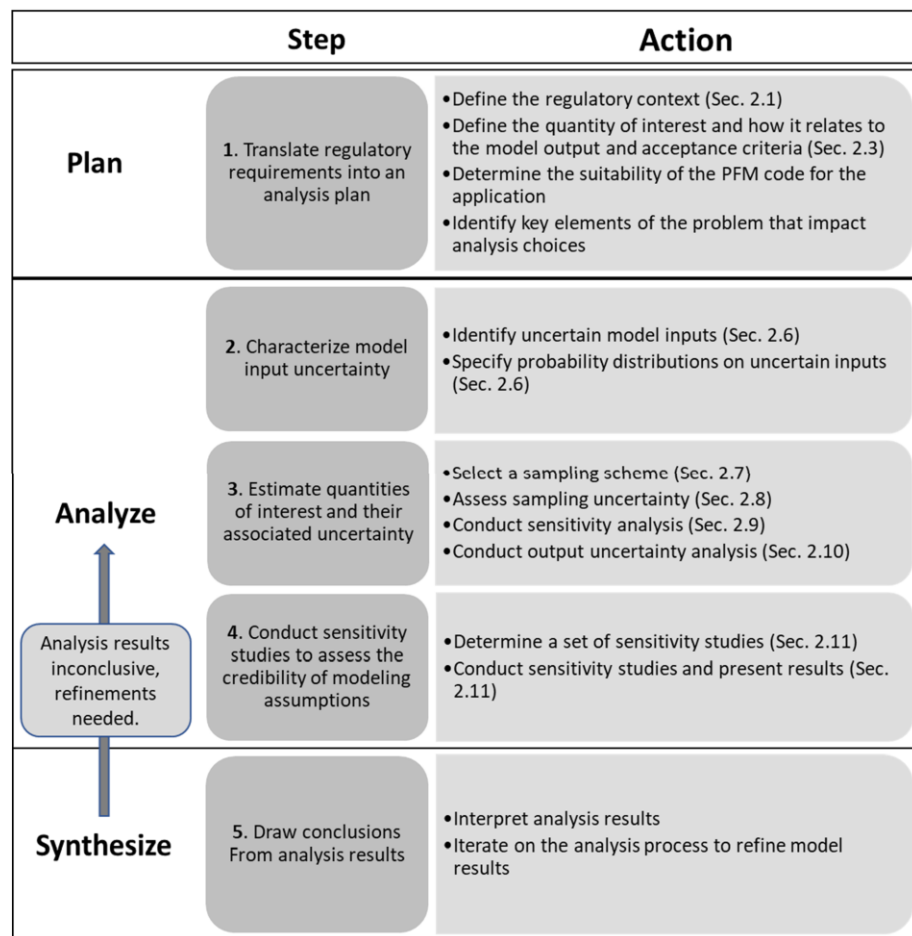
PWRのRPVの耐圧部分の溶接継手に対する検査間隔の検討事例

- 検査間隔に関するPFMによる検討経緯及び評価結果を下表に示す。

西暦	検討者	内容
2006年	PWROG	ASME Section XIで規定されていたRPVの溶接継手に対する検査間隔の延長を検討。
2007年	NRC	PWROGに対し、評価における入力データ等の情報提出を要求。
2007年	PWROG	「10年目で検査し、その後検査しない」場合と「10年の検査間隔」の場合の破損頻度の変化量を算出。 ➤ Beaver Valley Unit 1: 9.37×10^{-10}/炉年 ➤ Palisades: 1.81×10^{-8}/炉年 ➤ Oconee Unit1: 1.26×10^{-8}/炉年 以上の結果から、検査間隔を変更してもRG1.174の許容基準に比べて低いと評価。また、RG1.174の基準のほか、検査間隔を10年から20年に延長しても深層防護を含む考え方を満足すると結論。検査間隔の延長に関する技術的根拠(WCAP-16168-NP Rev.2)をNRCに提出。
2008年	NRC	PWROGによるPFM評価に、NRCが整備したFAVORが用いられていることを踏まえ、その評価が妥当であることを確認したうえで、PWROGの提案を許容可能と結論。

米国NRCの規制ガイド

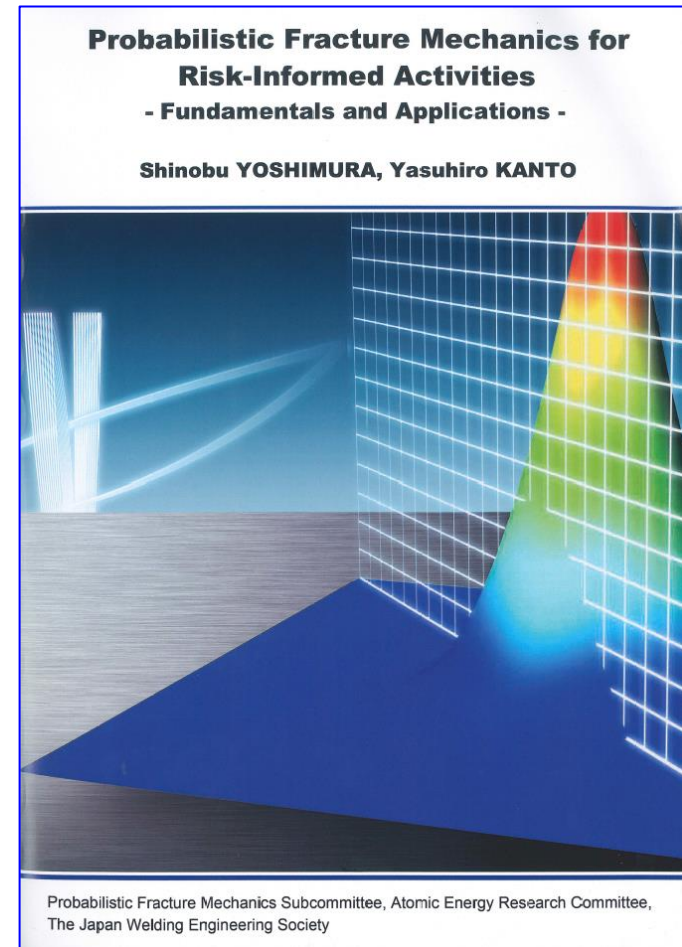
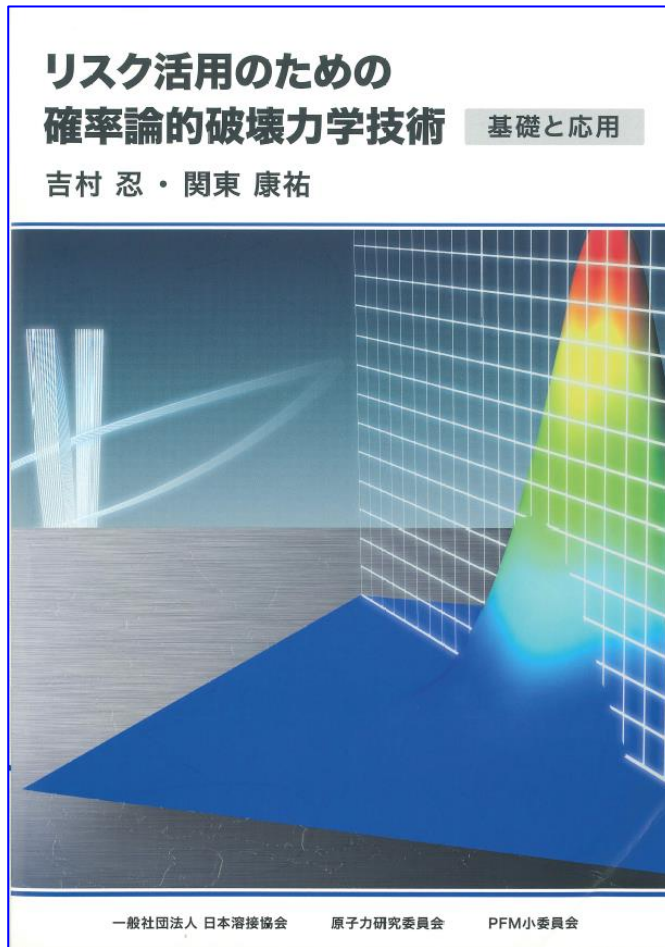
- PFM解析行う際に、NRCのスタッフが適切だと考えている NRCへの申請書を、ライセンス取得者(事業者)が作成するためのフレームワークを取りまとめたガイドラインが発行された。(2022)
 - U.S.NRC Regulatory Guide 1.245
 - NUREG/CR 7278 (RG-1.245の付属文書)
- これは、PFMに係る申請書を作成するためのグレーデッドアプローチについて説明し、PFM解析を実施するための一般的な技術的根拠を提供



「規制に適用されるPFMソフトウェアは、ソフトウェア品質保証SQA(Software Quality Assurance)の枠組みのもとで開発され、精度検証と妥当性検証V&V(Verification & Validation)を通じて検証されていなければならない。」とされ、FAVORの最新バージョン等が承認されている。

日本におけるPFMの実活用に向けて:学協会の取組

- 日本溶接協会では、1987年からPFM小委員会が設立されており、PFM解析技術に関する調査、手法の検討、解析コードの比較解析や応用研究等の幅広い活動が進められている。それらをまとめたPFM本を出版し、協会HPより無料公開中。



日本におけるPFMの実活用に向けて:学協会の取組

- 日本電気協会では、世界に先駆け、RPVのPTS事象に対するPFM解析に係る「**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*)**」を発刊(2019年3月28日)
*<https://nusc.jp/jeac/4640/jeag4640.html>

PFM-1000 一般事項

PFM-1100 目的及び適用範囲

PFM-1200 用語の定義

PFM-1300 対象とする機器及び部位

PFM-1400 破損頻度計算手順の概要

PFM-2000 応力拡大係数の算出

PFM-2100 事象の選定

PFM-2200 温度分布の時刻歴

PFM-2300 応力分布の時刻歴

PFM-2400 溶接残留応力分布

PFM-2500 想定亀裂

PFM-2600 応力拡大係数

PFM-3000 破壊靱性の算出

PFM-3100 中性子照射量

PFM-3200 化学成分

PFM-3300 関連温度

PFM-3400 破壊靱性

PFM-3500 亀裂伝播停止破壊靱性

PFM-4000 不確かさのモデル化

PFM-5000 破損頻度の計算

PFM-5100 計算手法

PFM-5200 破損の判定

PFM-5210 亀裂進展

PFM-5220 亀裂伝播停止

PFM-5230 亀裂貫通

PFM-5300 条件付破損確率

PFM-5310 条件付亀裂進展確率

PFM-5320 条件付亀裂貫通確率

PFM-5400 過渡事象の発生頻度

PFM-5500 破損頻度

PFM-5510 亀裂進展頻度

PFM-5520 亀裂貫通頻度

PFM-5600 信頼度

附属書A(規定):解析コードの検証方法

附属書B(参考):国内モデルプラントに対する
解析条件及び解析手法の例

附属書C(参考):過渡事象に関する解析条件例

日本におけるPFMの実活用に向けて:学協会の取組

- **日本原子力学会**から、「原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準」が改訂され(2015年)、PFMに基づく経年配管のフラジリティ*評価が明記されている。
- **日本機械学会**から、確率論的解析を踏まえた「発電用原子力設備規格 高速炉機器の信頼性評価ガイドライン」が発刊された(2019年)。また、現在、「発電用原子力設備規格 静的機器に対する目標信頼性設定と適合性評価のためのガイドライン(目標信頼性ガイドライン)」が、発刊待ちの状況である。

* フラジリティ(fragility): 地震動の強さあるいはそれによる荷重の関数として機器やシステムの脆弱性を確率で表す概念

日本におけるPFMの実活用に向けて：電気事業者の取組

電気事業者は、RPVの溶接継手の試験程度等に係る新規制要件*¹の対応に関連し、今後、米国等の取り組みを参考に、RPVに対する非破壊検査について、PFMに基づく評価の検討に取り組むと表明している*²。

*1 原子力規制委員会：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の解釈及び実用発電用原子炉及びその附属施設における破壊を引き起こす亀裂その他の欠陥の解釈の一部改正について(改正 令和元年6月5日 原規技発第1906051号 原子力規制委員会決定)

*2 第10回(原子炉圧力容器の溶接継手の試験程度等)新規制要件に関する事業者意見の聴取に係る会合(令和元年08月05日) 資料10-2より抜粋

日本におけるPFMの実活用に向けて：産学連携の取組

PFMの実活用に関する検討委員会が、産学連携の自主組織（事務局は電中研）として2018年12月に設立され、活動している。

- 現実の原子力発電プラントの構造設計評価、より合理的な運転や保守を行うことを目的として、国内の実プラントの条件に基づくPFM解析を実施する。
- この活動により、国内炉の現実の破損確率レベルを確認することができると共に、異なるPFMコードを用いたり、異なる解析者が解析することによって生じ得る、PFM解析結果のばらつきを特定する。
- 2024年度内に、テクニカルレポートを公開予定。

本レポートは2025年3月に

<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=EX24003>

から公開されました。

日本におけるPFMの実活用に向けて：学協会の取組

日本電気協会・規格委員会・構造分科会・破壊靱性検討会のもとに
PFMに特化した臨時検討会が2024年より活動開始。

- 原子炉圧力容器のPFM 解析ガイドラインJEAG4640 2018 を発行し、その後も引き続き PFM の検討が行われているものの、現状は、研究、検討の 位置付けに留められており、国内では 実プラントの運転、規制への PFM の適用はなされていない。
- 一方、事業者のPFM 適用のニーズは高まりつつあることから、どのように検討し、取り組んでいけば、実プラントへの PFM の適用に繋がるのか、それを元に規格にどのように反映していくべきかを議論する。

参加機関

- 大学
- 研究所 (JAEA, CRIEPI等)
- ATENA, 発電事業者, メーカー
- 原子力規制庁

破壊靱性検討会の運営方法に従う(定足数、会議中音声の録音、議事録の公開等)。

日本におけるPFMに関わる人材育成

- ・ JAEAと東大の連携講座
 - ✓ 東大の大学院に特別コースを設置し、東大＋JAEA専門家＋外部講師による講義を実施、PFMに関する講義も実施
 - ✓ シンポジウムやセミナーを開催し、産業界、学术界、規制機関、国民に向けて、情報発信とコミュニケーションを実践
- ・ 日本溶接協会原子力研究委員会PFM小委員会
 - ✓ PFMの技術や活用方策に関わるシンポジウムを開催
- ・ 資エネ庁受託による電中研及び東北大の人材育成事業
 - ✓ 『リスク情報を活用した意思決定』の保全活動における具体化、及びそのツールとなる『機器の材料劣化事象に対する確率論的な健全性評価手法』を整備していくための人材養成のための研修を開催

日本におけるPFMの実活用に向けた取組と残された課題

1. 得られた確率値の解釈

解析対象が同じでも、解析条件の設定が変わる。解析条件が変われば値は変わる。解析対象、解析条件が共に同じでも、解析コードが変われば値は変わる。そのような状況下で、工学的に「**ほぼ同じ、大きい、小さい**」をどのように判定するか？

2. 実験値・実測値と解析結果の比較によるV&Vができない。

PFMのValidationとはどうあるべきか？ PSAも同様の課題あり

3. 確率値活用に関する、専門家と一般の人々との理解のギャップ

ギャップをどのように埋めるか？ ➡ 一般の人々も、金融・保険、健康・医療、事故、受験などで確率やリスクを活用して、日々の意思決定を行っている。
➡ 原子力固有の問題としない、幅広い視点を！

4. 対象となる現象に対する標準的解析要領の整備

5. 確率値に基づく規制・許容基準の整備

そもそも**安全目標**をどのように設定するか。安全目標の設定の無い中で確率値ベースの規制は可能か？

6. 確率値に基づく具体的な意思決定事例の蓄積

7. 初期亀裂分布、非破壊検査結果等のデータの収集・共有化

日本におけるPFMの実活用に向けた取組と残された課題

1. 得られた確率値の解釈

解析対象が同じでも、解析条件の設定が変わる。解析条件が変われば値は変わる。解析対象、解析条件が共に同じでも、解析コードが変われば値は変わる。そのような状況下で、工学的に「**ほぼ同じ、大きい、小さい**」をどのように判定するか？

例 破損頻度(1/炉・年) 10^{-6} と 10^{-8} をどう判断するか？

破損頻度 2×10^{-6} と 4×10^{-6} 、 2×10^{-8} と 4×10^{-8} をどう判断するか？

同じ問題をPASCALで解いた時とFAVORで解いた時の結果の差をどのように判断するか？、...

➡ PFMの実活用に関する委員会が、2024度内にテクニカルレポートを公開予定

2. 単純に実験値・実測値と解析結果の比較ができない。

PFMのValidationはどうあるべきか？ ➡ 複数のコードによる定量比較と、差の理由分析、結果の公開・社会的共有

3. 確率値活用に関する、専門家と一般の人々との理解のギャップ

ギャップをどのように埋めるか？ ➡ 一般の人々も、金融・保険、健康・医療、事故、受験などで確率やリスクを活用して日々の意思決定を行っている。

➡ 原子力固有の問題としない、幅広い視点を！

日本におけるPFMの実活用に向けた取組と残された課題

4. 対象となる現象に対する標準的解析要領の整備

➡ 電気協会のJEAG 4640-2018あり。さらに拡充か新規作成か、等について、電気協会のPFM臨時検討会において検討が進行中。

5. 確率値に基づく規制・許容基準の整備

そもそも安全目標をどのように設定するか。安全目標の設定の無い中で確率値ベースの規制は可能か？ ➡ 安全目標が設定されるのが望ましいが、たとえば、現行の決定論による評価基準を、PFMで評価し破損確率ベースの評価基準に置換してみるというアプローチはあり得る！

6. 確率値に基づく具体的な意思決定事例の蓄積

➡ 検査程度の変化の破損確率や炉心損傷頻度への影響と、検査員被爆への影響の2種類のリスク指標を総合的に判断！

➡ 運転期間延長に伴う破損確率の変化の関係はどうなるか？

7. 初期亀裂分布、非破壊検査結果等のデータの収集・共有化

➡ データは日本の中のどこかにはある。誰かが持っている。秘匿するのではなく、それを共有し、活用する。

原子力分野の新技术導入に関するもう一つの課題

ステップ1: ある設計基準を設定

ステップ2: それに従って、構造やプラントを設計し、運用開始。
その設計基準に従えば、十分に安全である、世界一厳しい基準であると宣言する。

ステップ3: 新技术を適用して設計を行おうとすると、なぜ従来の手法で設計せずに、新しい設計基準で設計するのか、従来の手法で設計すれば、十分に安全であると言っていたのではないかと、
従来設計の正当性を疑われるのではないか。

ステップ4: 従来設計手法を踏襲していれば、認めてもらえる。逆に言えば、新技术を適用するインセンティブが働かない。

■ 新技術と規格の本来のあり方

製品(対象)の力学的性能評価

構造健全性・安全性 Integrity & Safety

設計 Design

規格 Code & Standard

運用保守 Operation & Maintenance

⇔ デジタルツイン Digital Twin

(シミュレーション + センサ・アクチュエータ + データサイエンス)

新技術のR&D フィードバック
 ➡ 規格化

 ➡ Real Worldへの適用

第5回原子力分野の確率論的破壊力学手法に関する国際シンポジウムISPMNA5

主催：  原子力規制委員会
原子力規制庁



国立研究開発法人
日本原子力研究開発機構

場所：東京（一橋大学一橋講堂）

日程：2024年10月7-9日

- ・ **ISPMNA**: PFM手法の研究開発・その実活用を促進するための情報交換や議論の場を提供する国際シンポジウム。これまでに、カナダ、アメリカ、イギリスで開催されてきました。PFM手法に関わる研究開発経験、活用実績等を共有し、国内におけるPFM手法の実活用をより一層加速させるため、第5回シンポジウムが日本で開催された。
- ・ **トピックス**: 手法の研究開発、規格基準類の整備、実活用を促進する各国の実活用事例・課題に関するセッションに加えて、**ステークホルダーと規制機関の代表者**とで意見交換を行う**パネルセッション**も実施された。
- ・ これらの成果は、**ウェブサイト**: <https://ispmna.com>で公開されている。

■ おわりに

■ 本講演では、第1部で、決定論的破壊力学と確率論的破壊力学、安全係数と破損確率の関係について説明した後に、PFMの基礎を概説し、その上で、第2部で破損確率とリスクの関係、安全とリスクの関係等について述べた。その後に、第3部でPFM解析技術の国内外の開発状況、海外における実活用実績、国内の最新状況について説明した。

■ PFMは健全性評価やリスク情報活用のキーテクノロジーとして成熟してきており、国内においても、国際水準に比べて遜色のない技術基盤が整備されてきた。

■ 日本においても、PFMの実活用に向けて機運が高まってきているが、実活用を現実のものとするには、**産官学民挙げてのより一層の統合的な取組み**が必要である。

■ 今後、ある時突然PFMの実活用が開始される可能性があるが、それをしっかりと受け止め、原子力のより一層の安全性向上と合理的運用に活かしていくことが重要である。



最後まで視聴いただき、ありがとうございました。

謝辞

本講演資料作成にあたり、(一社)日本溶接協会原子力研究委員会PFM小委員会の委員各位より協力をいただいた。