



確率論的破壊力学の原子力関連規格への 取り込みに関する展望と課題

(PFMを取り入れた規格に関する海外の動向)

電力中央研究所 山本真人

M&M2015 材料力学カンファレンス

2015年11月23日

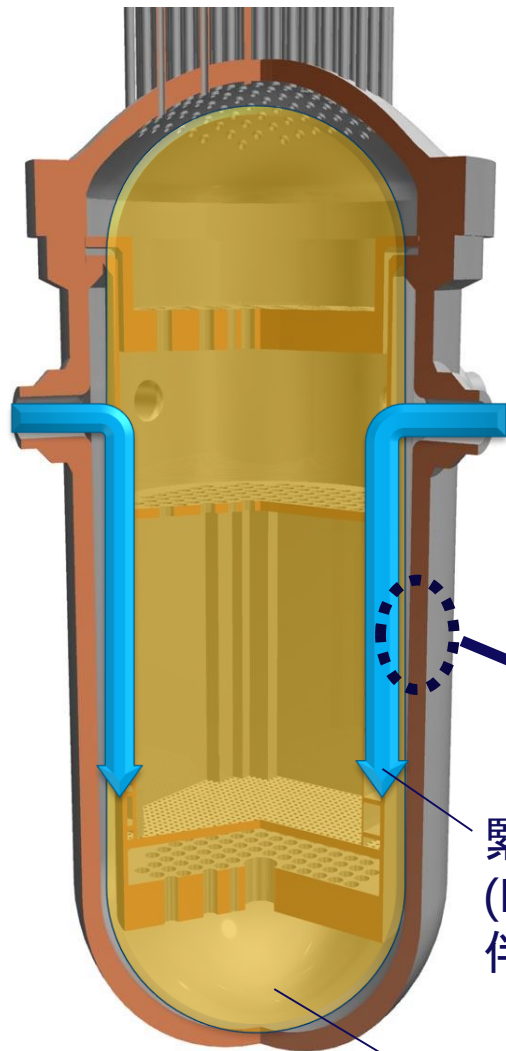
目 次

- 原子力機器の健全性評価とPFM
 - 評価対象の機器と事象
 - なぜ確率論？（決定論と確率論）

- 国外の状況
 - 米国における状況
 - 評価コードの開発
 - 規制への取り込み
 - 米国以外の諸国における状況
 - フランス, 日本

原子力機器の健全性評価とPFM

評価対象の機器と事象：圧力容器, PTS事象

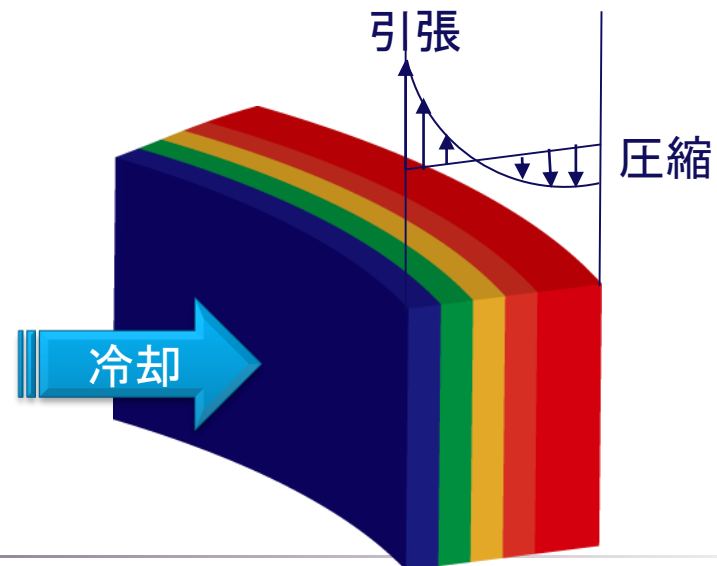


- 原子炉の起動停止や緊急時炉心冷却系の作動に伴い、圧力容器の内外面に温度差が生ずると

- 熱膨張・熱収縮により板厚方向に分布した熱応力が発生する
- 温度の低下に伴い、遷移温度域では破壊靱性が低下する

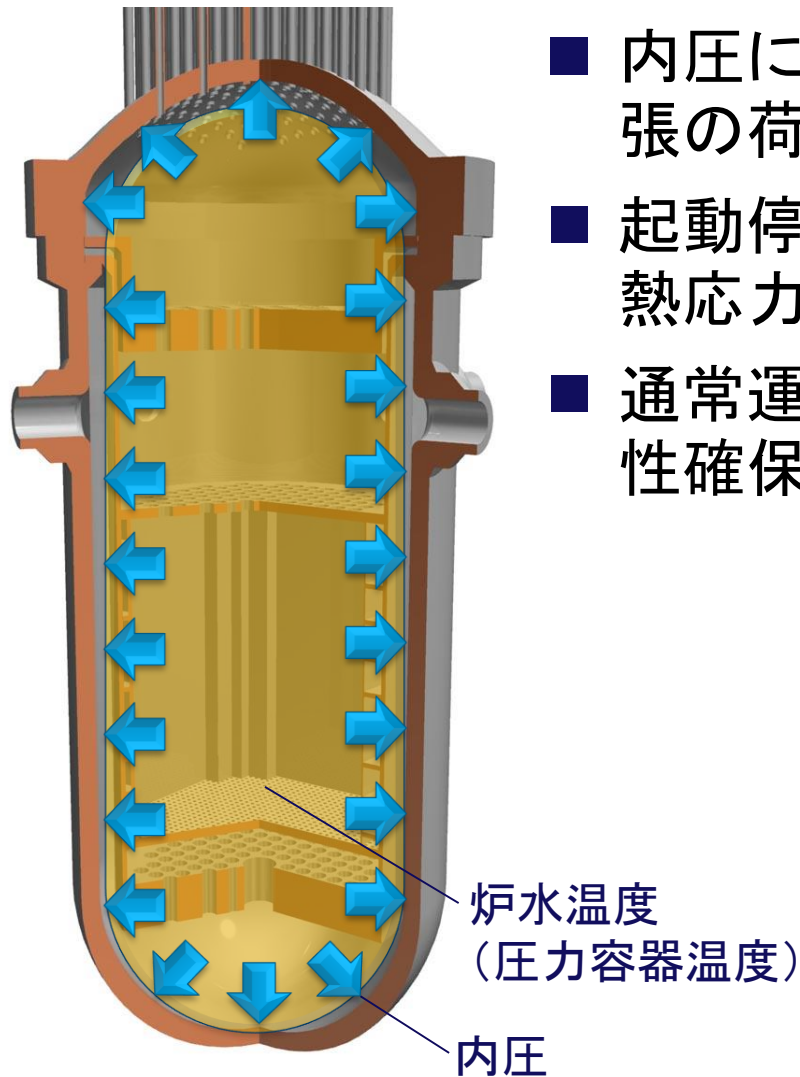
緊急時炉心冷却系
(ECCS)の作動に
伴う炉壁の急冷

PWR圧力容器 炉水温度の降下

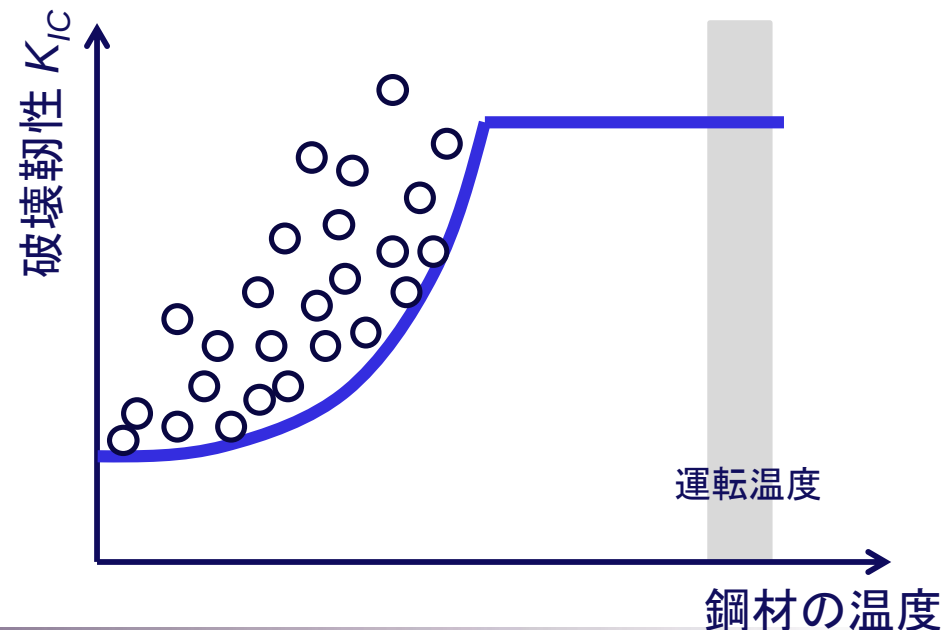


評価対象の機器と事象： 圧力容器，起動停止，耐圧漏洩試験

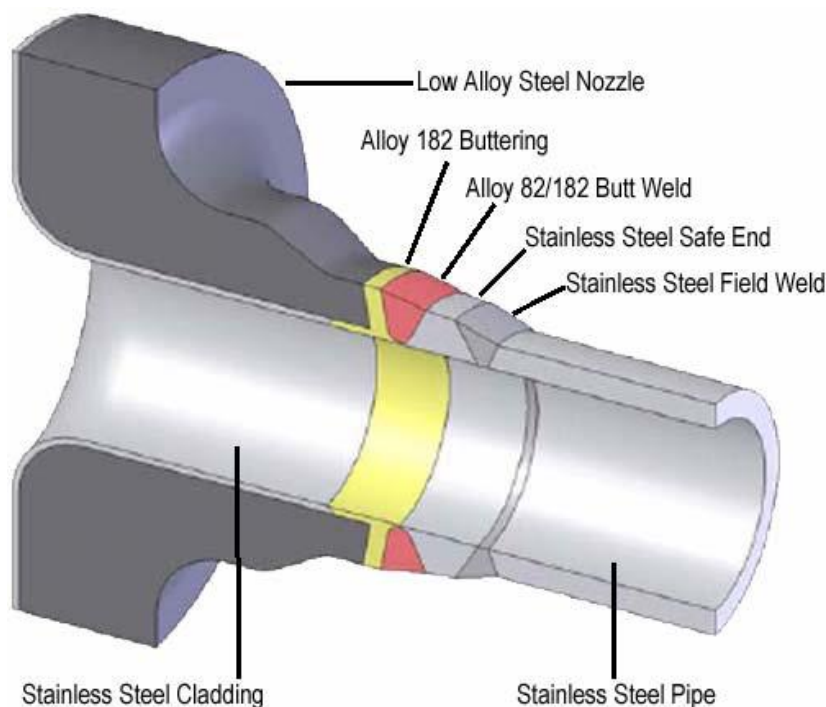
- 内圧により、胴部の周方向および軸方向に引張の荷重が負荷される
- 起動停止時の非定常な内外面温度差により熱応力が発生する
- 通常運転時より靱性の低い温度域での健全性確保



PWR圧力容器



配管：破断前漏洩(LBB)評価



■ 対象部位の例

□ ステンレス鋼配管-低合金鋼ノズルの異材接合部

■ 亀裂進展

□ SCCや環境疲労による周方向亀裂進展

□ 複数亀裂の合体

■ 漏洩

■ 配管の破断

なぜ確率論か：決定論と確率論の比較

■ 決定論

□ 保守性の積算

- すべての変数を保守的に見積もる
- 変数の見積もりに保守的なモデルを用いる
- **大きな保守性**

■ 確率論

□ 破壊確率の算出

- 変数の統計分布特性
- 各変数の関係性
- **破壊確率に応じ，最終結果に対して保守性を設定**

PTS事象を支配する変数

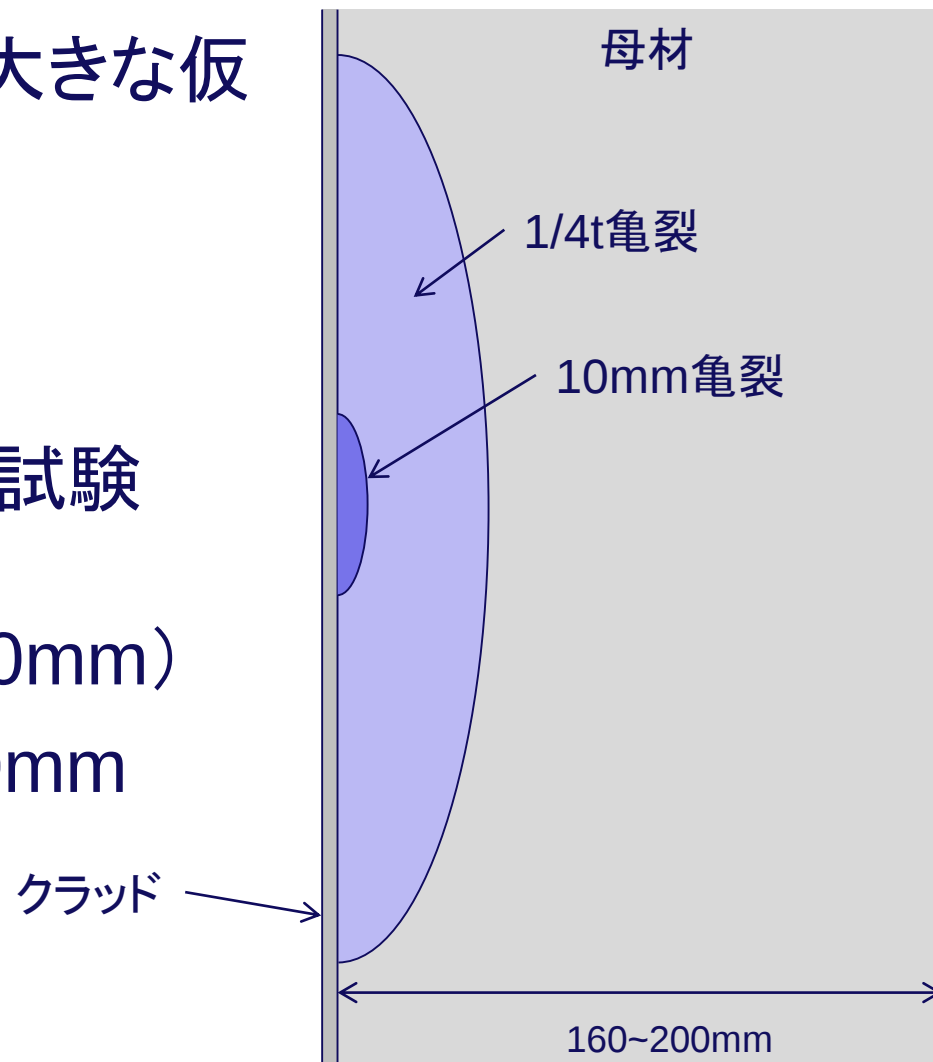
temperature
cladding
event type
(R,T) Mn
load Φ (a,2c)
Ni Cu P
 $= f(x, y, z, t)$

なぜ確率論か：(例) 決定論における亀裂の設定

- 保守性を担保するため、大きな仮想亀裂とする

■ 深さ

- 起動・停止および耐圧試験
⇒ 板厚の1/4
(亀裂深さ40~50mm)
- PTS ⇒ 亀裂深さ 10mm



なぜ確率論か：規制実施者のメリット，産業界のメリット

■ 規制実施者

- 構造健全性評価における多くの評価パラメータの影響を定量的に評価し，規制要求で設定するクライテリアの物理的根拠，信頼性を向上させることができる。
- 原子力プラントのような複雑系においては，個々の評価（ここではRPVや配管の健全性）の精度を向上することでプラント全体のリスク評価の信頼性を向上できる。

■ 産業界

- それぞれの評価パラメータに具体的，定量的な分布を設定することで，保守的なクライテリアの積重ねで評価する決定論に比較し，評価の合理化が期待出来る。

米国の状況

ラスムッセン報告における各事象のリスク

TABLE 6-3 INDIVIDUAL RISK OF EARLY FATALITY BY VARIOUS CAUSES
(U.S. Population Average 1969)

Accident Type	Total Number for 1969	Approximate Individual Risk Early Fatality Probability/yr ^(a)
Motor Vehicle	55,791	3×10^{-4}
Falls	17,827	9×10^{-5}
Fires and Hot Substance	7,451	4×10^{-5}
Drowning	6,181	3×10^{-5}
Poison	4,516	2×10^{-5}
Firearms	2,309	1×10^{-5}
Machinery (1968)	2,054	1×10^{-5}
Water Transport	1,743	9×10^{-6}
Air Travel	1,778	9×10^{-6}
Falling Objects	1,271	6×10^{-6}
Electrocution	1,148	6×10^{-6}
Railway	884	4×10^{-6}
Lightning	160	5×10^{-7}
Tornadoes	118 ^(b)	4×10^{-7}
Hurricanes	90 ^(c)	4×10^{-7}
All Others	8,695	4×10^{-5}
All Accidents (from Table 6-1)	115,000	6×10^{-4}
Nuclear Accidents (100 reactors)	—	2×10^{-10} ^(d)

(a) Based on total U.S. population, except as noted.

(b) (1953-1971 avg.)

(c) (1901-1972 avg.)

(d) Based on a population at risk of 15×10^6 .

米国におけるPFMの開発と実用化

■ 圧力容器のPTS評価

- Rancho Seco原子炉の事故(1975)
 - PTS事象が実際に生じることの認識
 - PTSによる炉心損傷リスクの評価の必要性
- 米国における評価コード開発
 - PRAISE, VISA-II, OCA-P, **FAVOR**
- NRCが確率論に基づく規制を実施
 - 10CFR 50.61 (1985)
 - **10CFR 50.61a (2010)**

■ 配管

- PWRにおけるPWSCCの発生
 - PWSCCで亀裂の入った配管に対する評価の必要性
- 米国における評価コードの開発
 - NRCとEPRIが共同し**xLPR**を開発(2015年, Ver.2)

FAVORの開発

P. T. Williams, T. L. Dickson, and S. Yin,
Fracture Analysis of Vessels – Oak Ridge FAVOR, v12.1, Computer Code:
Theory and Implementation of Algorithms, Methods, and Correlations

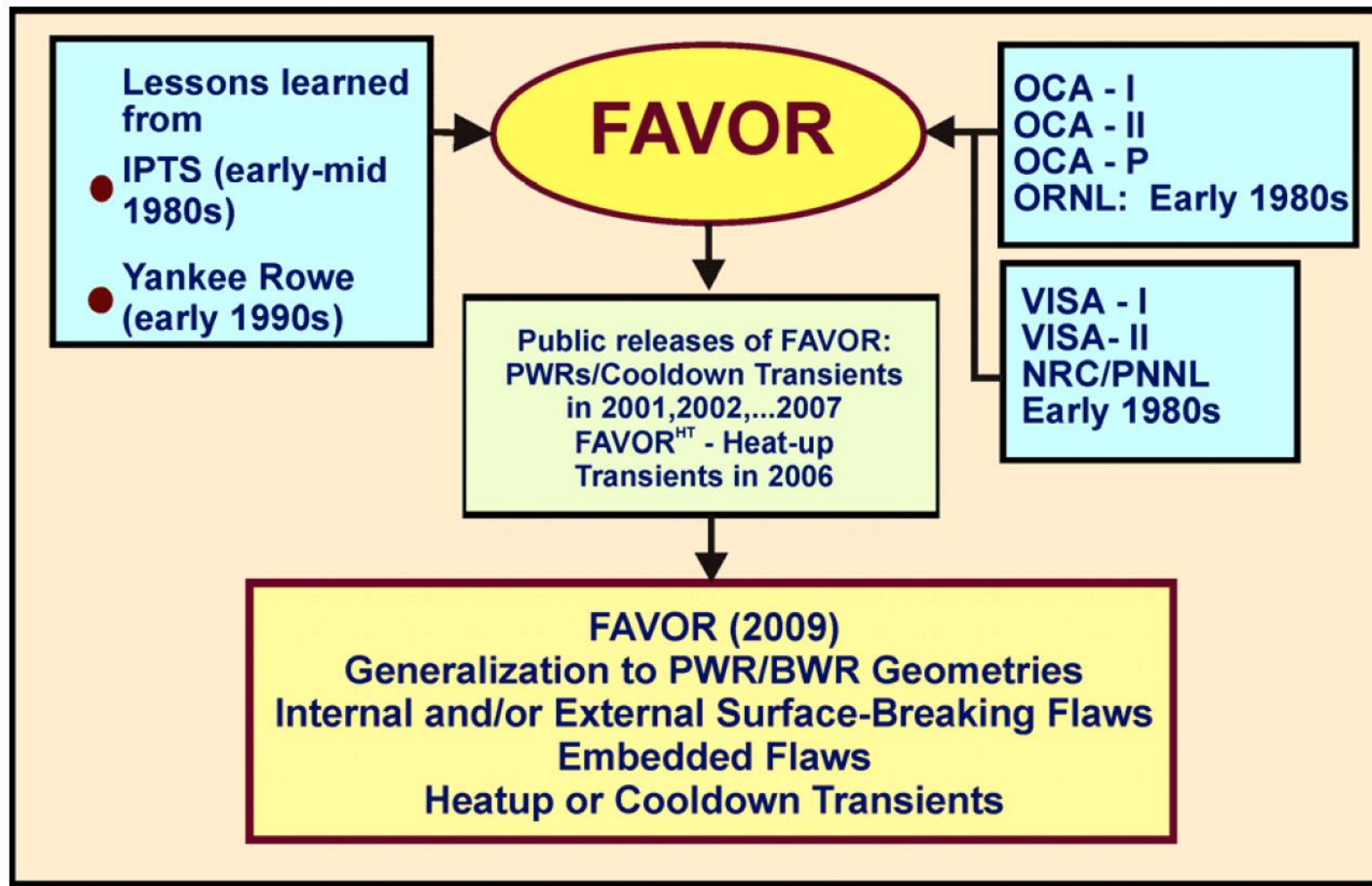


Fig. A1. Depiction of the development history of the FAVOR code

FAVORにおける計算の特徴

P. T. Williams, T. L. Dickson, and S. Yin,
Fracture Analysis of Vessels – Oak Ridge FAVOR, v12.1, Computer Code:
Theory and Implementation of Algorithms, Methods, and Correlations

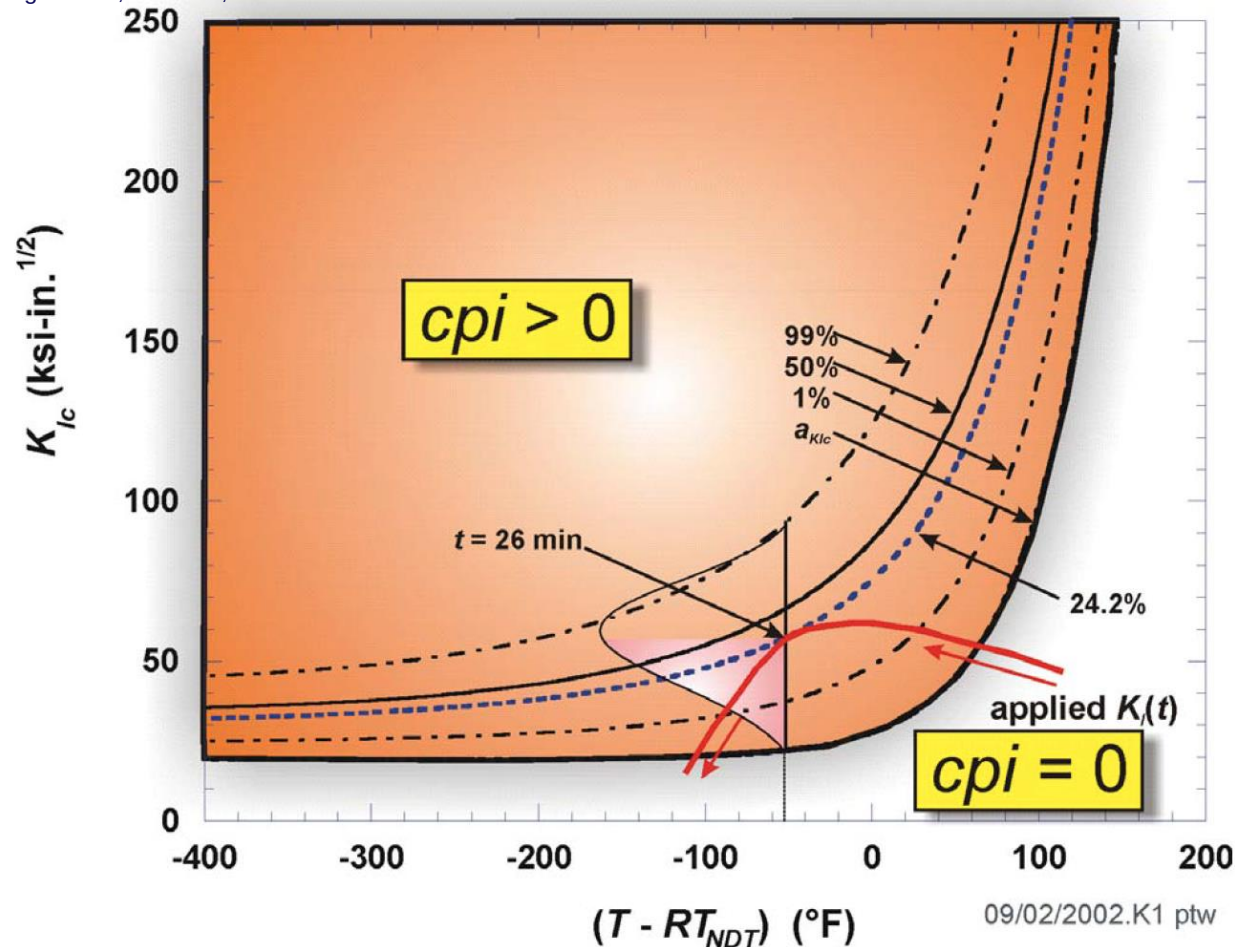
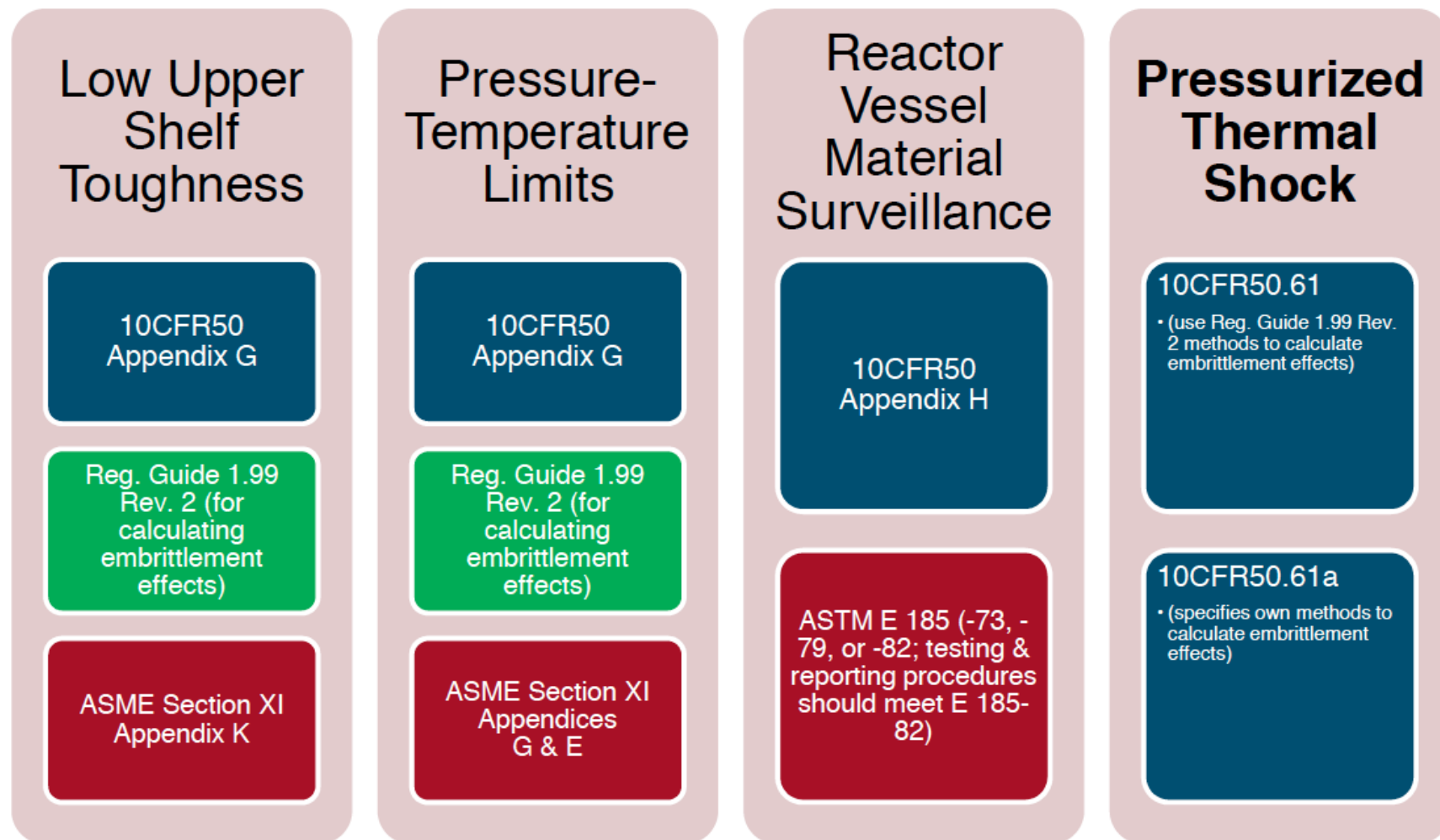


Fig. 11. Interaction of the applied K_I time history and the Weibull K_{Ic} statistical model for a postulated flaw.

米国のRPV健全性評価体系



青：連邦規則10CFR，緑：規制ガイド，赤：民間規格

PFMに基づく規則

PTS評価規則の経緯

■ 1985年: 10CFR50.61

- 照射脆化に伴うシフトを考慮した遷移温度 RT_{PTS} を継続運転可否の指標として設定
- 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: $RT_{PTS} < 149^{\circ}\text{C}$

■ 2000年代: NRC主導のPTS再評価プロジェクト

- 10CFR50.61制定当時のPTS評価の保守性を再評価
 - 評価対象のPTSイベントの精緻化 : FAVORコードの使用
 - 破壊靱性の求め方の精緻化 : マスターカーブ法の活用
 - 想定する亀裂の位置と寸法の適正化
 - RPV各部の脆化度合いの分布の考慮

■ 2010年: 代替規則10CFR50.61a

RT_{MAX} : 10CFR50.61aで採用された新たな指標

Product Form and RT _{MAX-X} Values	RT _{MAX-X} Limits [°F (°C)] for Different Vessel Wall Thicknesses ¹ (T _{WALL})		
	T _{WALL} ≤ 9.5 in (24.1 cm)	9.5 in (24.1 cm) < T _{WALL} ≤ 10.5 in (26.7 cm)	10.5 in (26.7 cm) < T _{WALL} ≤ 11.5 in (29.2 cm)
Axial Weld RT _{MAX-AW}	269 (132)	230 (110)	222 (106)
Plate RT _{MAX-PL}	356 (180)	305 (152)	293 (145)
Forging without underclad cracks RT _{MAX-FO} ²	356 (180)	305 (152)	293 (145)
Axial Weld and Plate RT _{MAX-AW} + RT _{MAX-PL}	538 (281)	476 (247)	445 (229)
Circumferential Weld RT _{MAX-CW} ³	312 (156)	277 (136)	269 (132)
Forging with underclad cracks RT _{MAX-FO} ⁴	246 (119)	241 (116)	239 (115)

- 指標の場合分け
 - 鍛造, 圧延
 - 母材, 軸溶接, 周溶接
 - 板厚方向深さ
- 新たな脆化予測式の採用
- 合理的な評価手法の採用により, 評価のための計算は複雑になったが, 従来の10CFR50.61と比べてより低い破損確率が得られるようになった
- Palisades発電所への適用をNRCが審査中

¹ Wall thickness is the beltline wall thickness including the clad thickness.

² Forgings without underclad cracks apply to forgings for which no underclad cracks have been detected and that were fabricated in accordance with Regulatory Guide 1.43.

³ RT_{PTS} limits contribute 1x10⁻⁸ per reactor year to the reactor vessel TWCF.

⁴ Forgings with underclad cracks apply to forgings that have detected underclad cracking or were not fabricated in accordance with Regulatory Guide 1.43.

米国以外のPFM研究動向

PFM研究開発

■ PFM関連研究

□ 国際ラウンドロビン解析

- 日本溶接協会PFM小委員会
- EDF, EPRI, 電中研

□ 多くのPFM関連論文が発表

- ASME PVP国際会議
- JSME M&M材料力学カンファレンス

□ 多くのPFM解析コードが開発

■ PFMの評価体系への取り込み

□ 民間規格への取り込み(ASME, JSME)

□ 民間規格の技術根拠としてPFMを活用

- 破壊靱性の下限界の設定

□ しかし, 規制要求への取込は限定的.

米国以外での動向

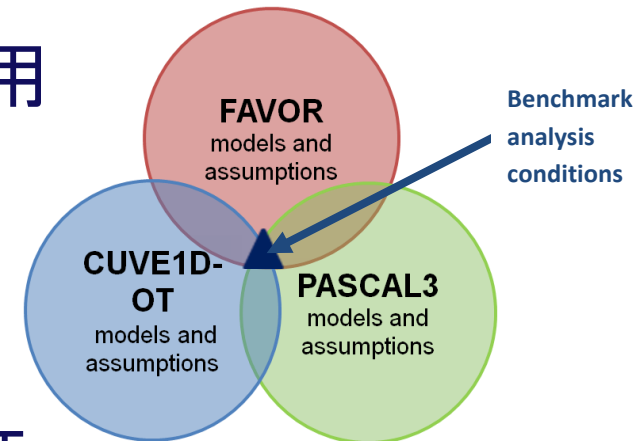
- 規制要求の一部として取り込み
 - フィンランド, カナダ

- 個別事象の評価に活用
 - ベルギー: Doel3, Tihange2原子炉の水素フレーキングの影響評価
 - ASME
 - 評価線, 評価式の決定にPFMを活用
 - ✓ ステンレス鋳鋼の熱時効評価
 - ✓ 異材接合部における溶接残留応力と亀裂進展評価

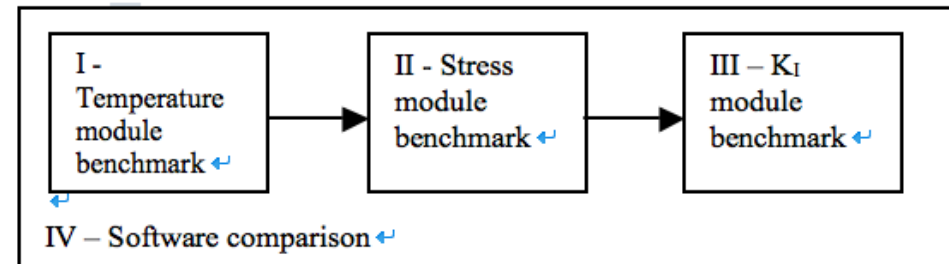
- 研究開発におけるPFMの活用

EdF, ERPI, 電中研ベンチマーク解析(1)

- フランス, 米国, 日本のコードを使用
 - CUVE1D-OpenTURNS
 - FAVOR
 - PASCAL3
- SB-LOCA, LB-LOCA, SOVを評価

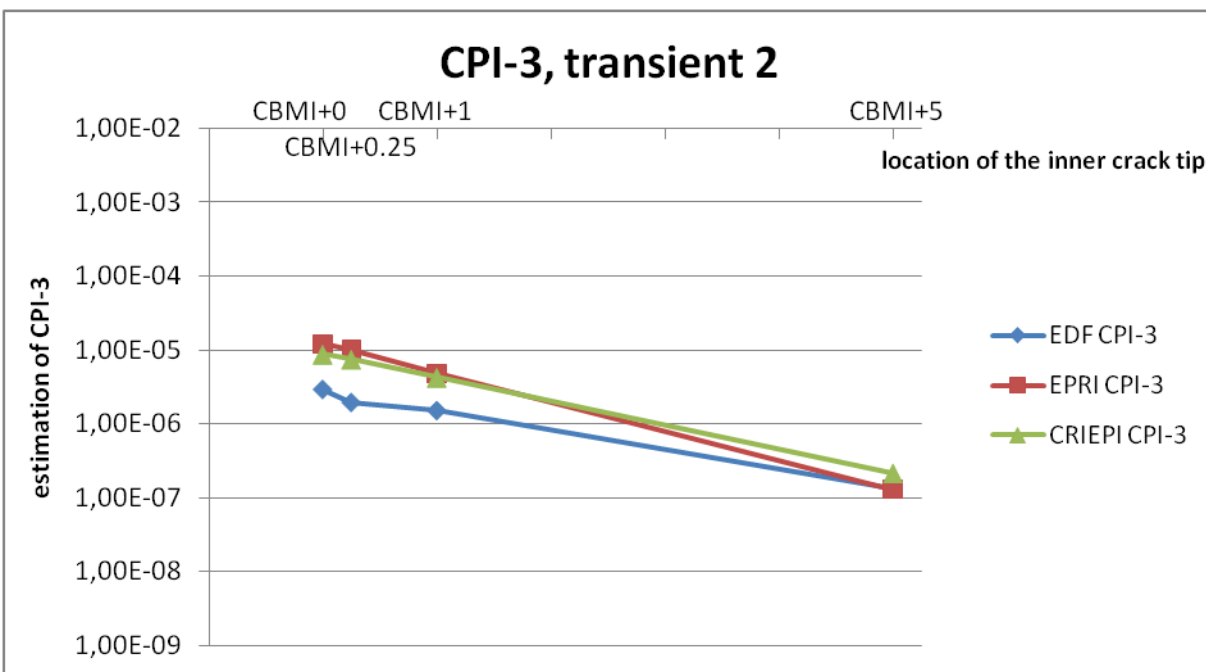


	CPI-1	CPI-2	CPI-3
Number of random variables	2	4	5
K_{IC}	X	X	X
RT_{NDT}	X	X	X
Flaw depth		X	X
Flaw aspect ratio		X	X
Fluence			X



DAUTREME et. al, "MAI BENCHMARK CAMPAIGN OF INTERNATIONAL SOFTWARE FOR REACTOR PRESSURE VESSEL INTEGRITY ASSESSMENT," Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference PVP2014, PVP2014-28212, July 20-24, 2014, Anaheim, California, USA

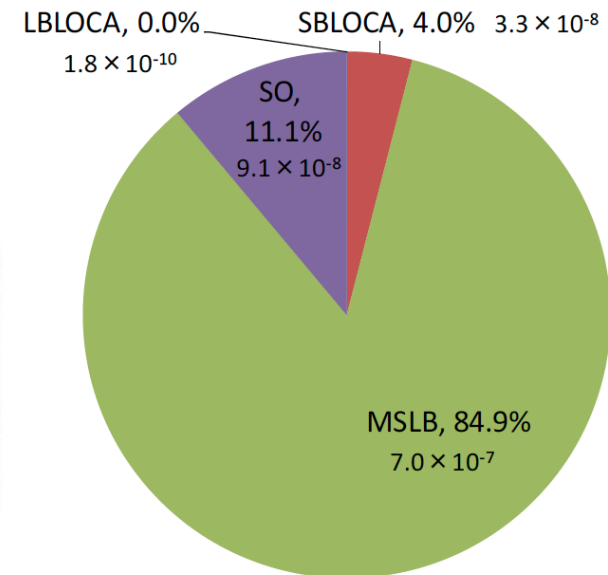
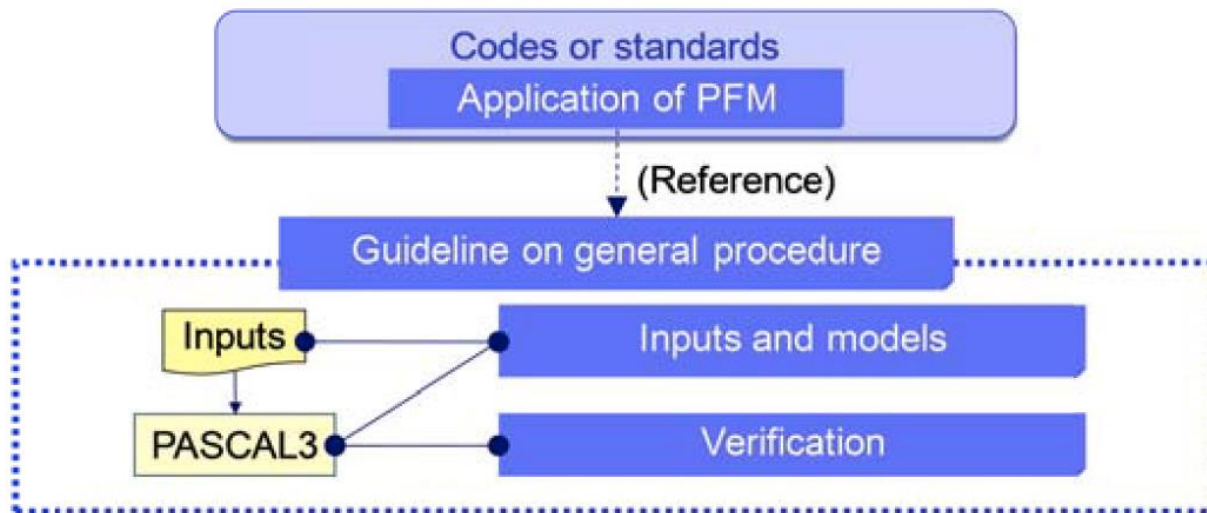
PFM計算例：条件付き破損確率



Location of the inner crack tip	EDF	EPRI	CRIEPI
CBMI + 0 mm	2.95E-06 (1938 trials)	1.20E-05 (10 ⁴ trials)	8.76E-06 (10 ⁸ trials)
CBMI + 0.25 mm	1.96E-06 (1865 trials)	1.00E-05 (10 ⁴ trials)	7.50E-06 (10 ⁸ trials)
CBMI + 1 mm	1.52E-06 (1937 trials)	4.8 E-06 (2.10 ⁴ trials)	4.25E-06 (10 ⁸ trials)
CBMI + 5 mm	1.31E-07 (2555 trials)	1.30E-07 (5.10 ⁴ trials)	2.13E-07 (10 ⁸ trials)

- 大LOCA時
- FAVOR (EPRI), Cuve1D-OT(EdF), Pascal3(CRIEPI)で各種コード間の結果を比較
- このケースでは条件付き破損確率が $10^{-5} \sim 10^{-8}$

JAEAプロジェクト: PASCAL3によるPTS評価の標準解法



- JAEAの開発したPASCAL3の, RPV健全性評価への活用を想定し, 標準的な入力条件を検討: 代表的なPTS事象に対し亀裂貫通への寄与を算出

Osakabe et. al, "Study on Application of PFM Analysis Method to Japanese Code for RPV Integrity Assessment under PTS Events," Proceedings of the ASME 2015 Pressure Vessels & Piping Conference PVP2015, PVP2015-45497, July 19-23, 2015, Boston, Massachusetts, USA

まとめ

- PFMの研究は積極的に行われ、実用化へ向けたフェーズにある.
- 米国では規制当局がPFMを積極的に採用し、規制要求のクライテリアの技術根拠としている. 民間は過度な保守性を排除できる合理的な評価手法として活用し始めている.
- 米国以外の諸国では、規制要求への取込は限定的であり、今後の適用拡大が望まれる.