

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

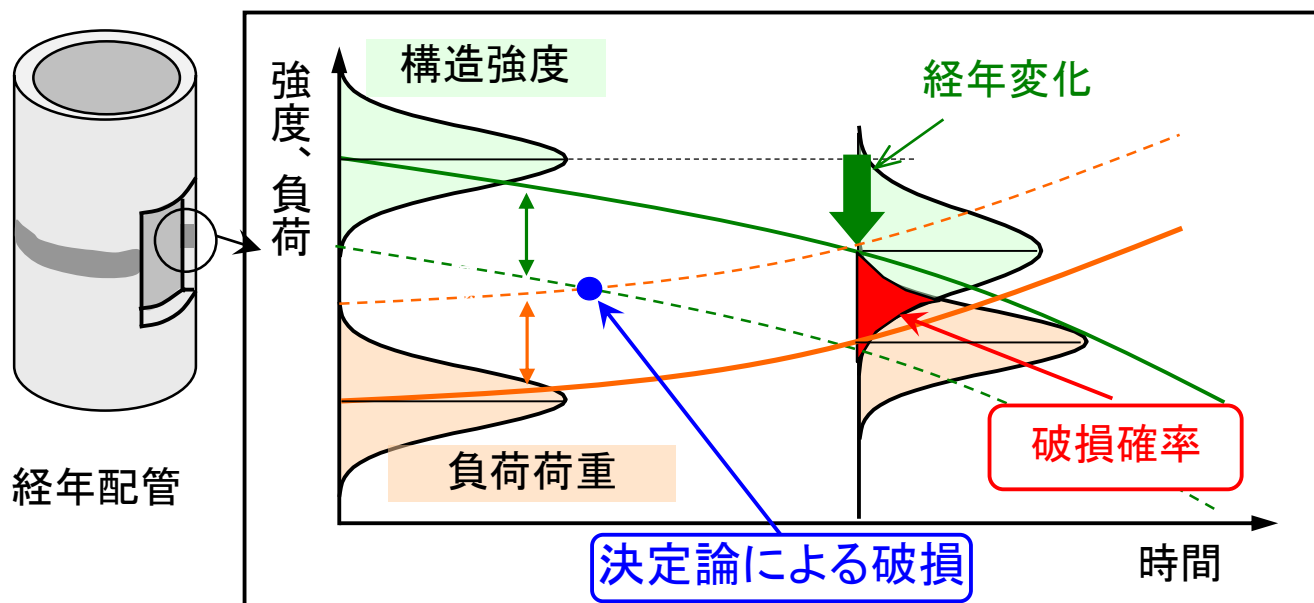
JAEAによるPFM解析手法の研究 ー 規制支援に向けた取り組み ー

李 銀生

日本原子力研究開発機構（JAEA）

安全研究センター 構造健全性評価研究グループ

- 確率論的破壊力学は個々の影響因子の固有の確率分布を考慮して、合理的で定量的な評価を行うことができ、その結果が相対比較が可能である等のメリットがある。
- 新規規制基準では安全性向上のための評価等が求められており、確率論的評価やリスク情報の活用が重要になっている。
- 欧米において、近年確率論的評価の規制への適用が進められている。



決定論と確率論による構造健全性評価

- JAEAでは、軽水炉構造機器の高経年化評価技術の高度化に関する研究の一環として、影響因子の不確実さを考慮可能な確率論的破壊力学(PFM) 解析手法に着目し、解析コードPASCAL* シリーズの開発等を進めている。

- ✓ PASCAL3: 原子炉圧力容器の中性子照射脆化を考慮した加圧熱衝撃(PTS)事象時の破壊確率解析コード
- ✓ PASCAL-SP: 圧力バウンダリ配管の応力腐食割れ(IGSCC, PWSCC, NiSCC)や疲労等を考慮した破損確率解析コード
- ✓ PASCAL-NP: 容器貫通部や管台部等の複雑形状部位におけるNi合金溶接部のSCCに対する破損確率解析コード
- ✓ PASCAL-EC: 炭素鋼配管の減肉に関する破損確率解析コード

*PASCAL: PFM Analysis for Structural Components in Aging LWR

JAEAのPFM解析手法
に関する研究開発の成果

国内外の
最新知見



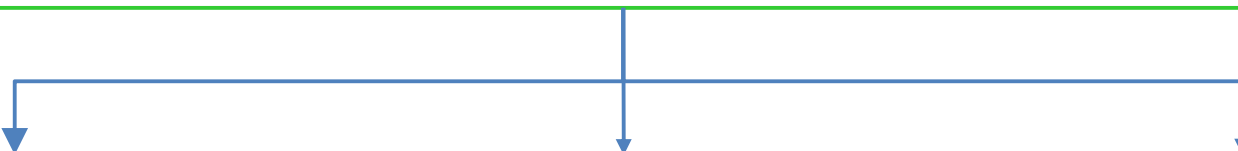
目的：国内における確率論的解析手法の活用を念頭においた
適用性評価を行い、PFM解析手法の実用化を図る

原子力規制庁事業「高経年化技術評価高度化事業
(原子炉一次系機器の健全性評価手法の高度化)」

対象：

原子炉圧力容器

一次系配管



標準的解析要領
の整備

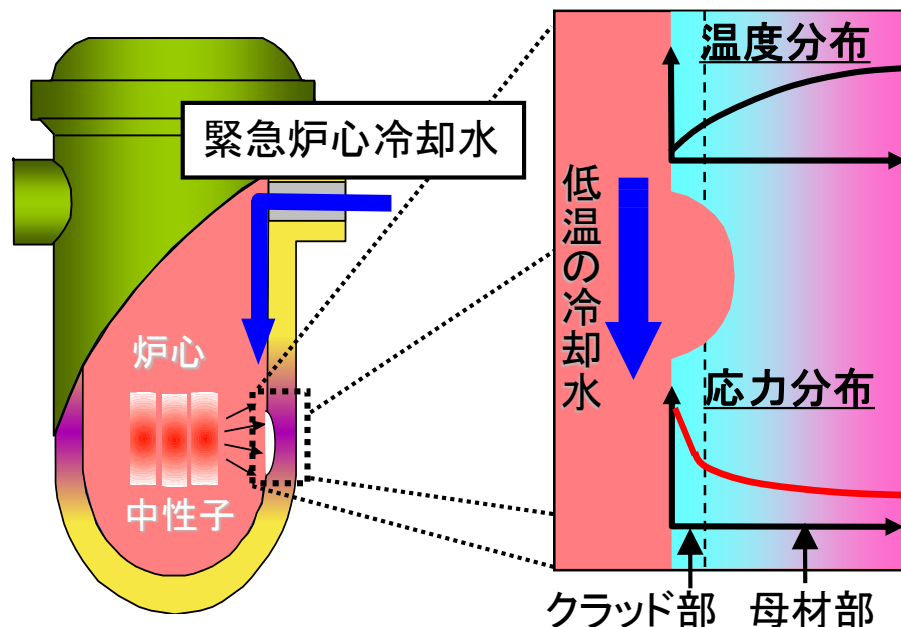
標準的解析手法及び
国内データの選定

解析コードの
信頼性確認

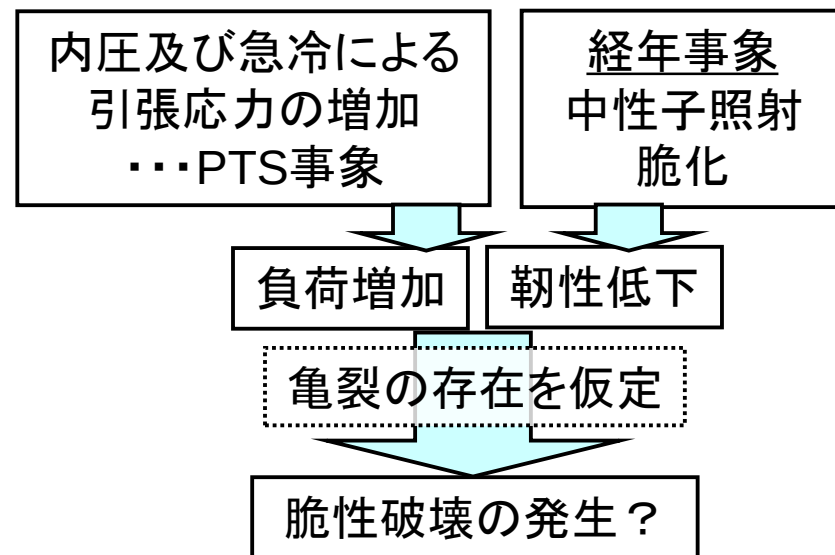
• 加圧水型原子炉压力容器の健全性評価手法

✓加圧熱衝撃(PTS)時における健全性を決定論的に評価* * :JEAC4206-2007

[PTS事象]



[健全性評価の流れ]



✓PTS (Pressurized Thermal Shock) 事象

原子炉冷却材圧力バウンダリに何らかの冷却材喪失が発生

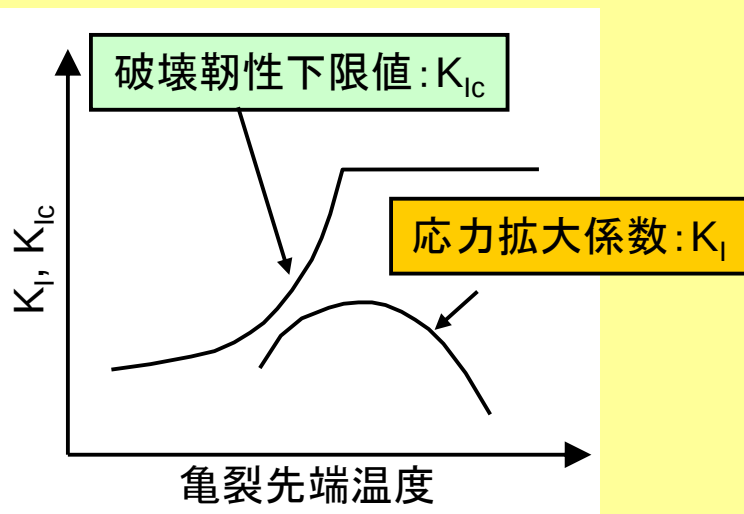
➤ 原子炉压力容器内に緊急炉心冷却水が注入

➤ 内圧がかかった状態で容器内部が急激に冷却

＜決定論と確率論による構造健全性評価＞

決定論的評価

ある寸法の亀裂の存在を仮定

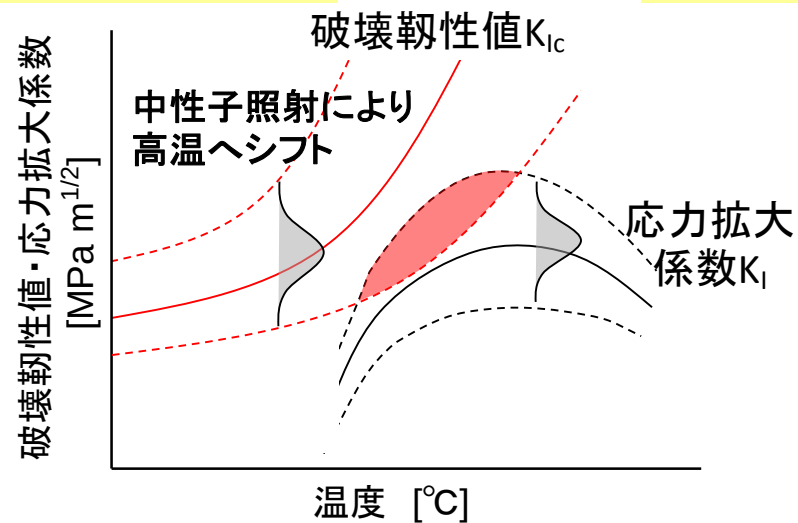


K_I 曲線と K_{Ic} 曲線が交わらなければ健全
($K_I < K_{Ic}$)

「ある確定的な条件の下で
破壊が発生するかどうか？」

☆安全率や保守的仮定を用いた判断

確率論的評価



「統計的ばらつきや不確実性を含む
現実的なシステムにおいて、
破壊が発生する確率はどの程度か？」

☆定量的・相対的な比較が可能

亀裂進展確率(CPI)、亀裂進展頻度(CIF)
亀裂貫通確率(CPF)、亀裂貫通頻度(TWCF)等

国内におけるPFM解析手法の活用を目標に、国内評価手法、評価モデル等を導入するとともに、解析精度や機能向上を図っている

- 照射脆化予測法（国内評価手法）
 - ✓ JEAC4201-2007(2013年追補)等の脆化予測法等
- 破壊靱性評価モデル（国内評価モデル）
 - ✓ 国内破壊靱性データに基づく確率論的評価モデル
 - ✓ 国内亀裂伝播停止靱性データに基づく確率論的評価モデル
- 応力拡大係数算出式（国内評価式/精度向上）
 - ✓ 国内規格(JSME維持規格)及びJAEAが整備した応力拡大係数解
 - ✓ クラッドの影響を考慮した応力拡大係数解
- クラッド部の亀裂進展モデル（機能向上）
 - ✓ クラッド内で脆性的に亀裂進展しない評価モデル
- 非破壊検査評価モデル（国内評価モデル）
 - ✓ 国内プロジェクトによる欠陥検出確率モデル
- 高温予荷重効果の評価機能の向上（機能向上）

⇒原子炉圧力容器のPTS事象時の亀裂進展頻度(CIF)、亀裂貫通頻度(TWCF)等を評価

10CFR50.61a
(2010)

• ベルギーの動向

- ✓ 2012年にDoel 3号機の原子炉圧力容器胴部で水素白点が確認されたことを踏まえて、これを考慮した健全性評価ではPFM解析を用いた確率論的評価が実施された。
- ✓ Doel 3の確率論的評価は、Beaver Valley Unit 1のPTS事象を参考に行われ、保守側に亀裂貫通頻度(TWCF)の代わりに亀裂進展頻度(CIF)を適用した。
- ✓ Doel 3の寿命末期のCIFは 2.3×10^{-8} /炉年となり、これは米国10CFR50.61aで規定されている許容基準 10^{-6} /炉年以下である。

出典：<http://fanc.fgov.be/GED/00000000/3300/3390.pdf>

• カナダの動向

- ✓ 圧力管、給水管及び大口径配管を対象に、PFM解析コードPRAISE-CANDUを用いた破損確率評価に係る審査事例が報告された。

出典：ASME PVP2015, PVPD Tutorial Series on Piping Probabilistic Fracture Mechanics—Approaches and Applications

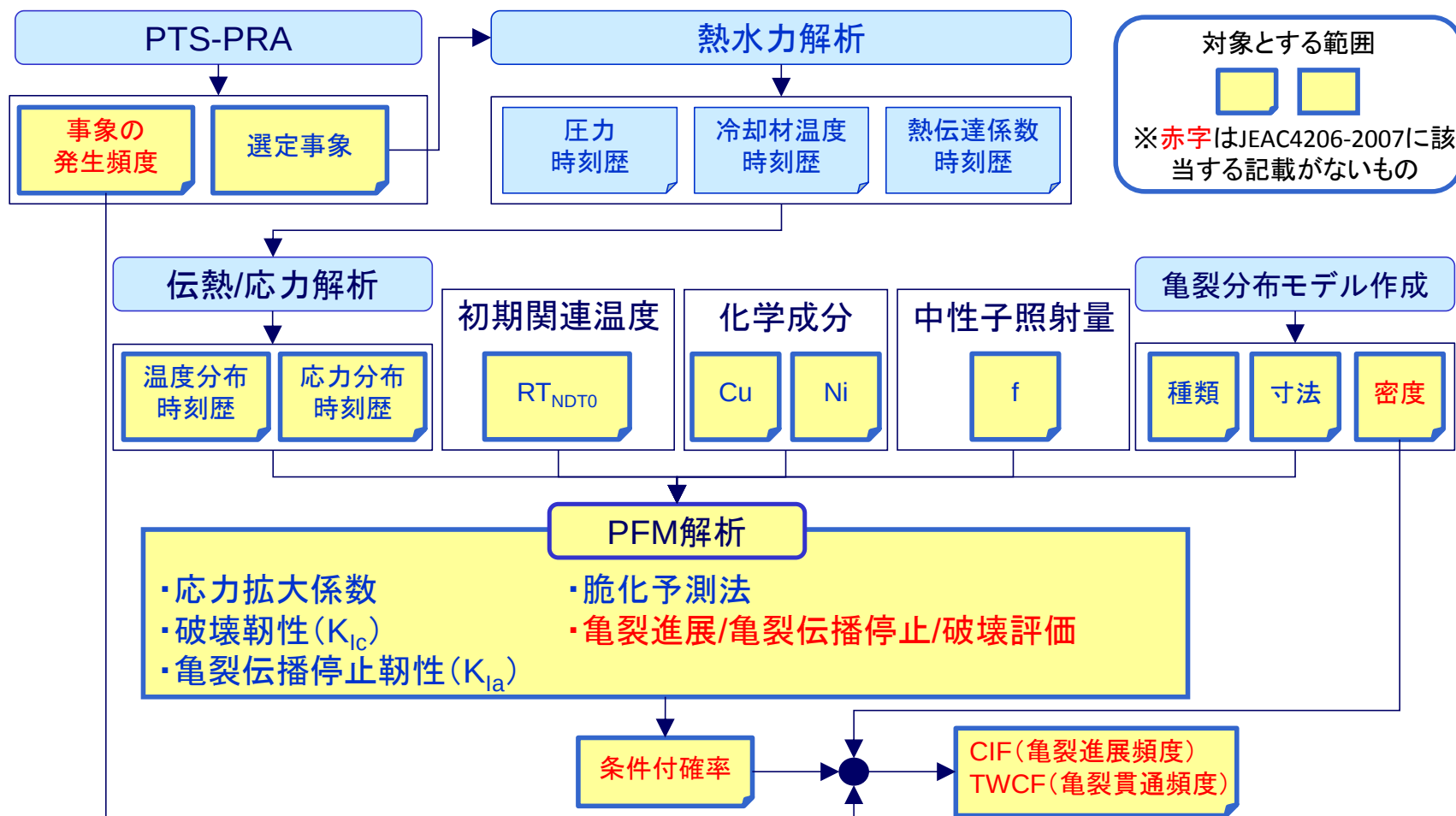
• 韓国、中国、台湾等の動向

- ✓ 原子炉圧力容器に対するTWCF評価の解析事例が報告されており、PFM解析の実用化に係る知見が蓄積されつつある。

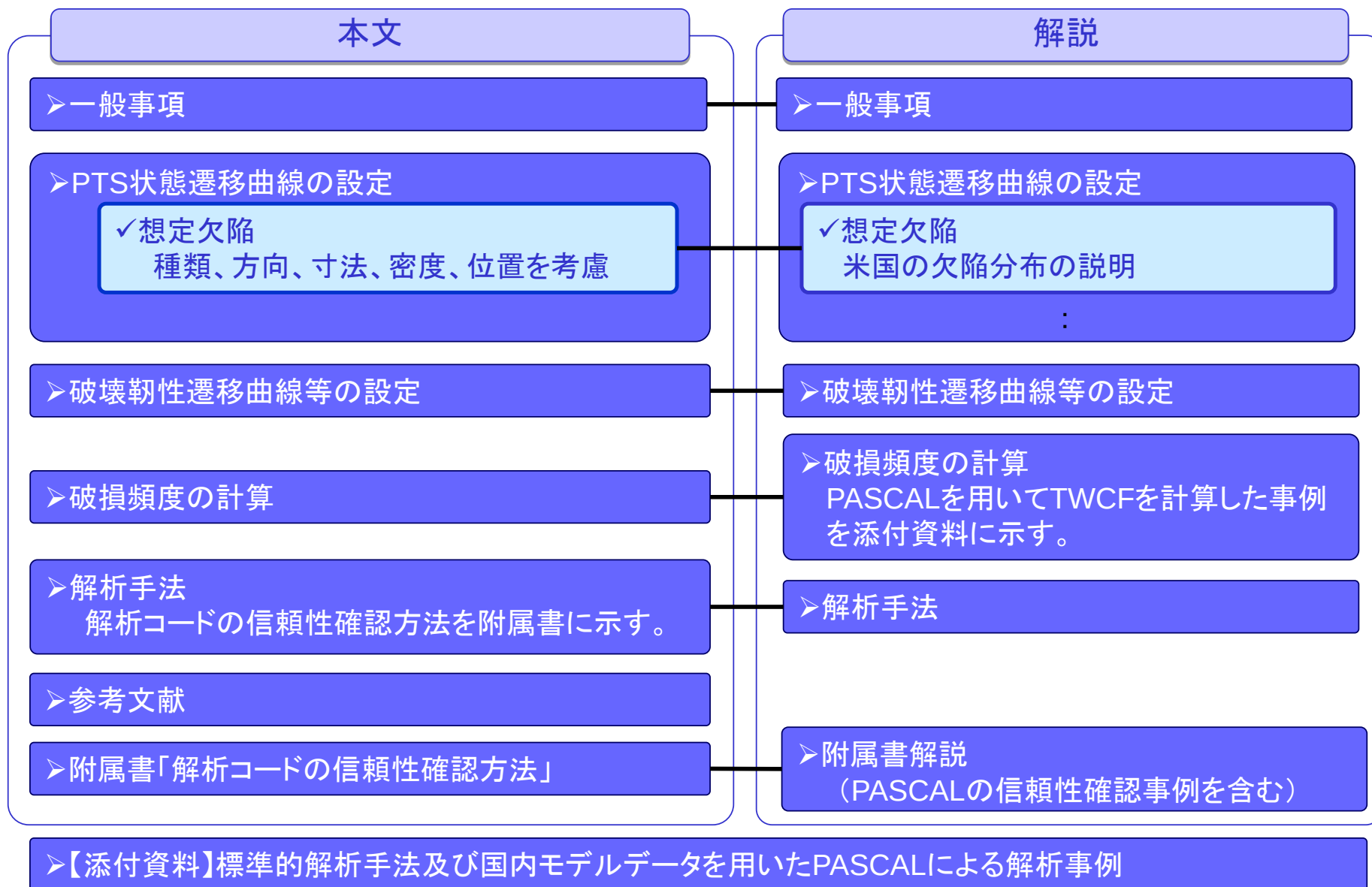
狙い

PFMを規制に係わる評価に適用することを目標に、**国内原子炉圧力容器を対象とした確率論的評価の実施**に向けて、PFM解析の標準的解析要領を整備

対象範囲



標準的解析要領の枠組み



・事例：国産鋼材破壊靱性データに基づくワイブル分布型評価モデル

出典：PVP2015-45915 (2015)

$$K_x(T - RT_{NDT}) = a(T - RT_{NDT}) - b(T - RT_{NDT}) \ln(1 - x)^{1/c(T - RT_{NDT})}$$

$$a(T - RT_{NDT}) = 21.24 - 0.29 \exp(-0.0076(T - RT_{NDT})) [MPa\sqrt{m}]$$

$$b(T - RT_{NDT}) = 12.39 + 89.29 \exp(0.0146(T - RT_{NDT})) [MPa\sqrt{m}]$$

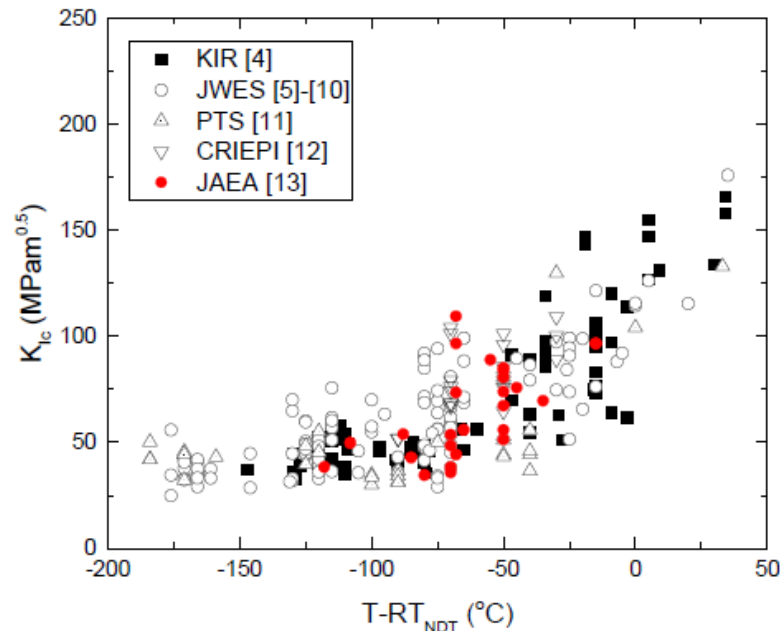
$$c(T - RT_{NDT}) = 2.93 + 0.80 \exp(0.0432(T - RT_{NDT}))$$

K_{Ic} の単位: $MPa\sqrt{m}$

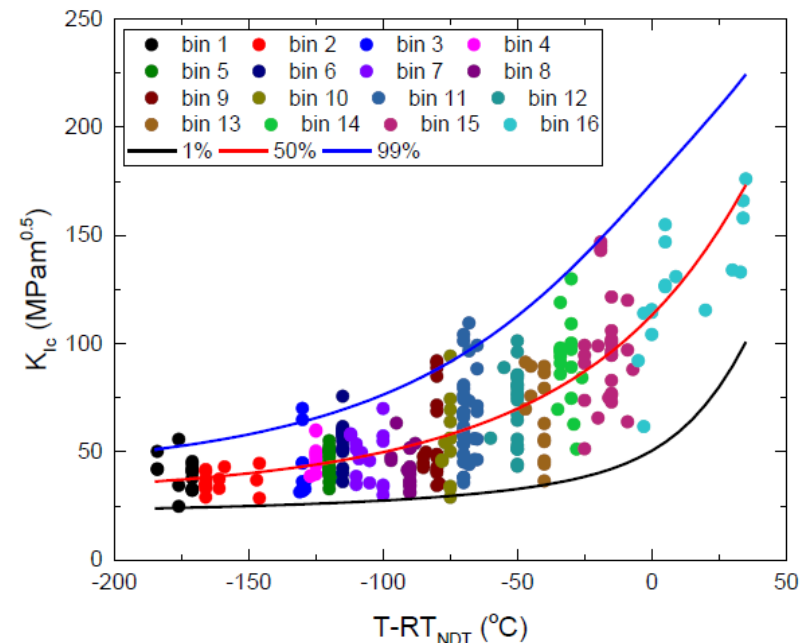
$T - RT_{NDT}$ の単位: $^{\circ}C$

x : パーセンタイル値

破壊靱性データ



ワイブル分布型曲線



• 信頼性確認の考え方

- ✓ ASMEの構造、流体分野等のV&V (Verification & Validation) では、各分野の専門家により個別に検討が進められている。
 - 原子炉圧力容器のPFM評価技術を中心とし、関連する他分野の専門家の方々の意見を反映する必要がある。
 - ⇒ 原子炉圧力容器健全性研究専門部会*で意見を集約する。
- ✓ 米国PFM解析コードであるFAVORのV&Vが既に実施されている。
 - FAVORのV&Vの手法の適用性を検討する。
 - ⇒ 解析機能の検証についてはFAVORのV&Vを参考とする。
- ✓ 破壊力学の各評価手法には多くの実験式が含まれる。
 - 実現象の再現性という観点では、破壊靱性評価式の定式化等、実験から得られたデータの定式化とその適用性の検討を行い、信頼性を確保する。
 - ⇒ 詳細は原子炉圧力容器健全性研究専門部会で議論を行う。

・信頼性確認内容

分類	信頼性確認項目
確率変数	RT _{NDT}
	化学成分
	中性子照射量
	破壊靱性
	亀裂伝播停止靱性
	初期亀裂
評価フロー・評価式	条件付亀裂進展確率
	条件付亀裂進展停止確率
	条件付亀裂貫通確率
	亀裂貫通頻度
	亀裂進展・停止時の評価
	高温予荷重効果の評価
	応力拡大係数
	亀裂種類及び応力拡大係数の切り替え
	脆化予測法
	中性子照射量 指数減衰
	溶接残留応力
	破壊評価

・事例：銅の化学成分の確率分布

✓ 銅の含有率の分布

- 分布型 : 正規分布
- 平均値 : 0.15 wt %
- 標準偏差 : 0.015wt%

✓ 信頼性確認方式

- PASCAL3のサンプリング結果を出力する。
- Microsoft Excelの関数出力と比較する。

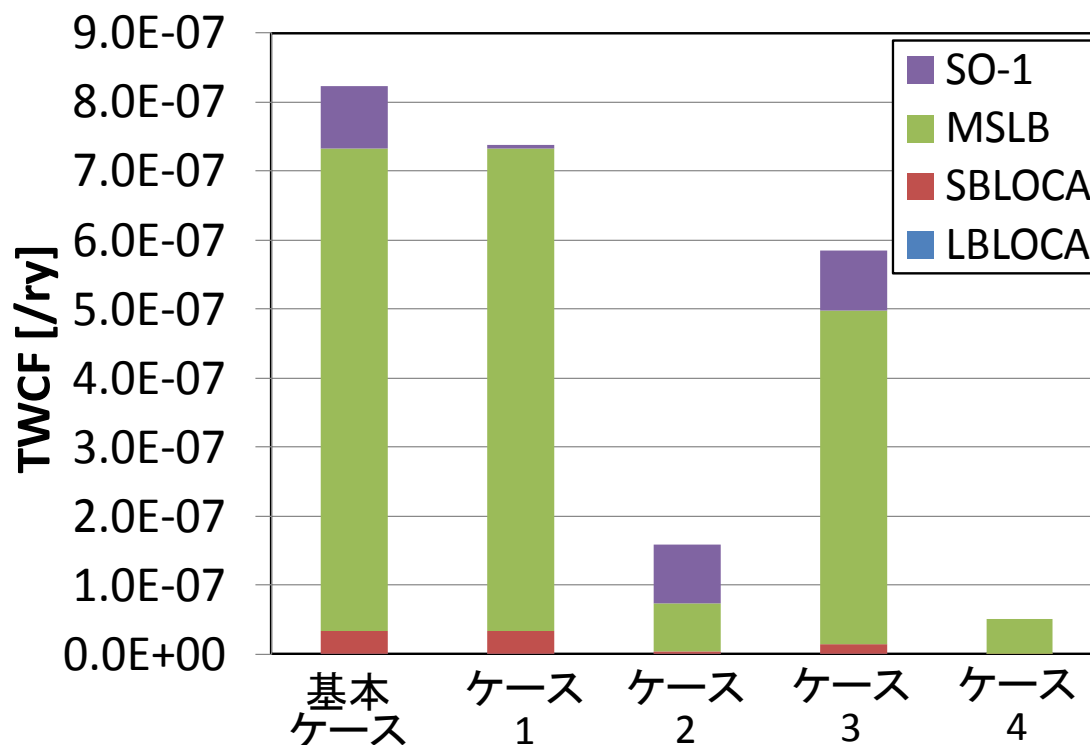
パーセン タイル	Excelの関 数出力 A	PASCAL3のサ ンプリング値 B	(B- A)/A*100 [%]
1	0.1151	0.1151	0.035
5	0.1253	0.1253	-0.032
50	0.1500	0.1500	0.007
95	0.1747	0.1746	0.034
99	0.1849	0.1848	0.033

基本解析条件

項目	内容
圧力容器	・内径: 2,000mm ・板厚: 200mm ・クラッド厚: 5mm ・胴部高さ: 4,000mm
初期亀裂(母材部)	・表面半楕円亀裂 ・内部楕円亀裂
過渡事象と発生頻度	・小破断LOCA: 5.9×10^{-4}/炉年 ・大破断LOCA: 7.1×10^{-6}/炉年 ・MSLB: 2.2×10^{-3}/炉年 ・SO-1: 9.9×10^{-4}/炉年
脆化予測法	・JEAC4201-2007
破壊靱性評価式	・国産鋼材のデータに基づくワイブル分布型曲線
亀裂伝播停止靱性評価式	・ORNLワイブル分布型曲線
初期RT _{NDT}	・0°C (Std. dev. : 9.4°C)
化学成分	・Cu : 0.16 wt% (Std. dev. : 0.01%) ・Ni : 0.61 wt% (Std. dev. : 0.02%)
最大中性子照射量	・1×10^{20} n/cm² (E>1MeV)
高温予荷重効果	・考慮する

感度解析結果例

解析ケース	表面亀裂	内部亀裂
基本ケース	○(深さが6mm)	○(米国密度分布データ)
ケース1	—	○
ケース2	○	○(密度を1/10)
ケース3	○	○(深さが6.57mm以上の内部亀裂なし)
ケース4	—	○(深さが4.38mm以上の内部亀裂なし)



JAEAでは、PFM解析手法の規制基準を含めた幅広い活用を目的に、各種解析コードの整備等を進めている。今後も引き続き、国内外の最新知見を踏まえ、国内における確率論的解析手法の実用化・標準化を進めていく。

- PRODAS ウェブサイトを通じて利用申請
 - ✓ <http://prodas.jaea.go.jp/>
 - ✓ JAEA Program and Database Retrieval System
- 利用マニュアル
 - ✓ PASCAL Ver.3
 - <http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Data-Code-2010-033.pdf>
 - ✓ PASCAL-NP
 - <http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Data-Code-2013-013.pdf>
 - ✓ PASCAL-SP
 - <http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Data-Code-2009-025.pdf>
 - ✓ PASCAL-EC
 - <http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Data-Code-2006-001.pdf>