

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 技術の概要)

関東 康祐

茨城大学工学部機械工学科

目次

PFMとは?

- 健全性評価
- データのばらつき
- 破壊確率

数値解析法

- Monte Carloシミュレーション
- PFM解析フロー

何に使えるのか?

健全性評価

荷重因子 < 強度

- 応力拡大係数 < 破壊靱性値
- 応力 < 降伏応力
- 亀裂深さ > $0.8t$

データのばらつき-1

ばらつき得るファクター

- 降伏応力
- 破壊靱性値
- 温度およびその時間変化
- 高速中性子束
- RT-NDT

強度に直接・間接的に影響を与える

データのばらつき-2

ばらつき得るファクター

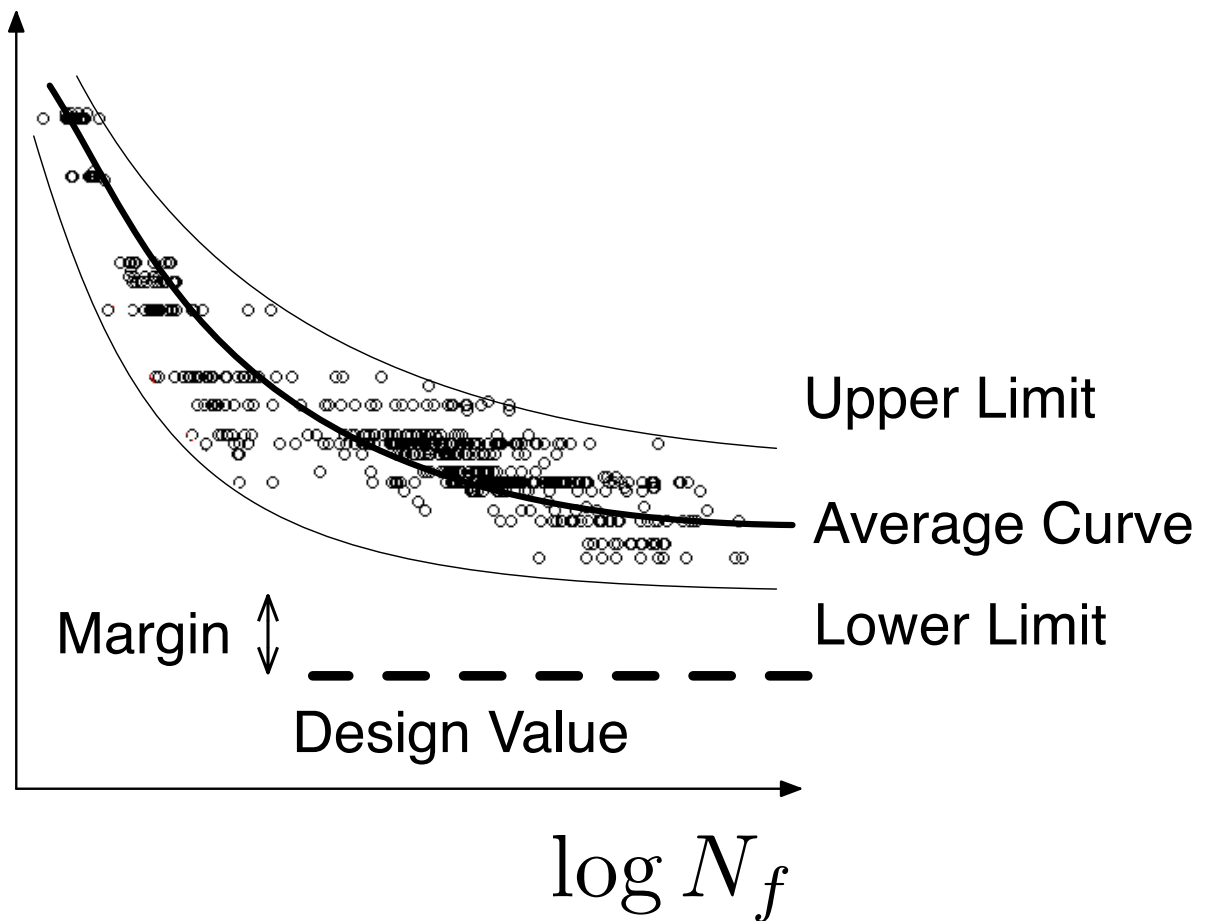
- 板厚
- 亀裂サイズ・アスペクト比
- 荷重

荷重因子に影響を与える

- 応力、応力拡大係数 & etc.

決定論的手法

保守的值 $\Delta\sigma$
安全率

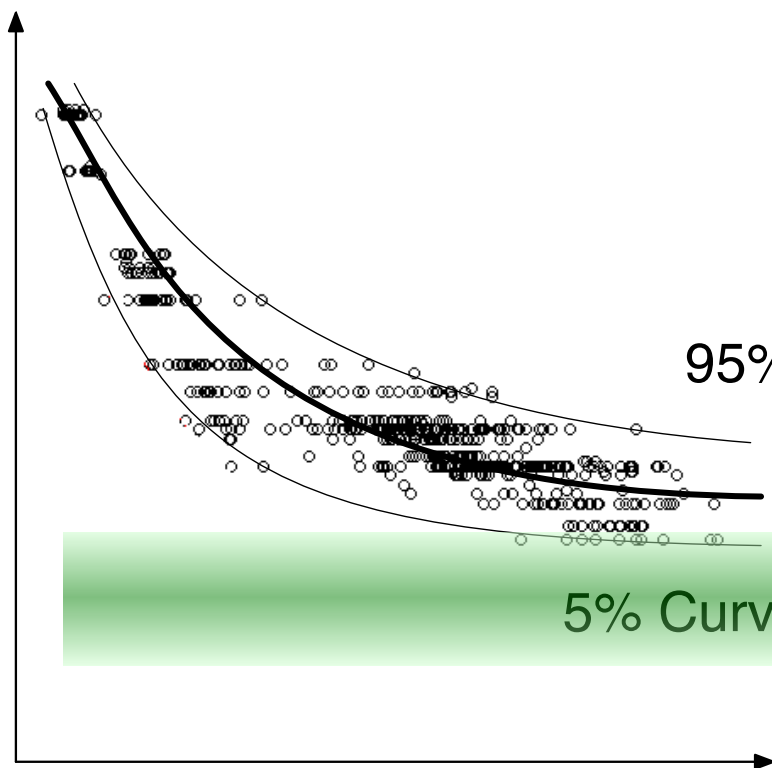


確率論的手法

確率分布

ばらつきそのもの

$\Delta\sigma$



95% Curve

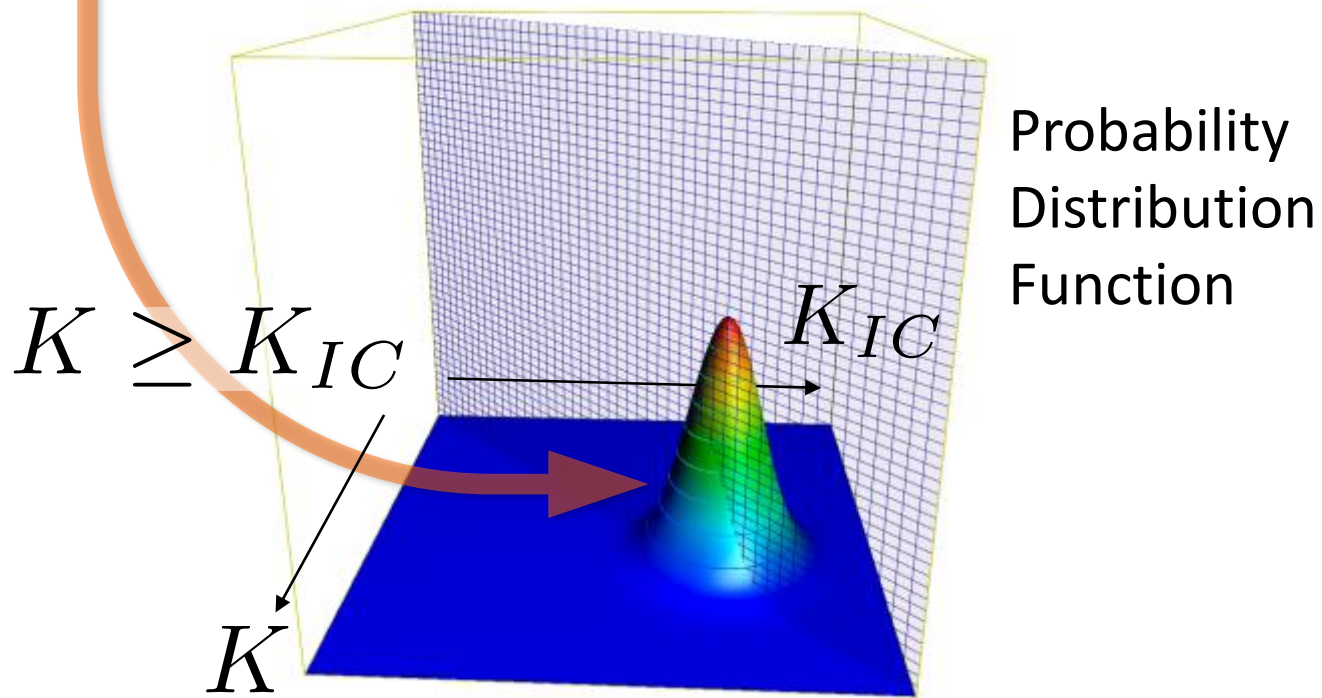
50% Curve

5% Curve

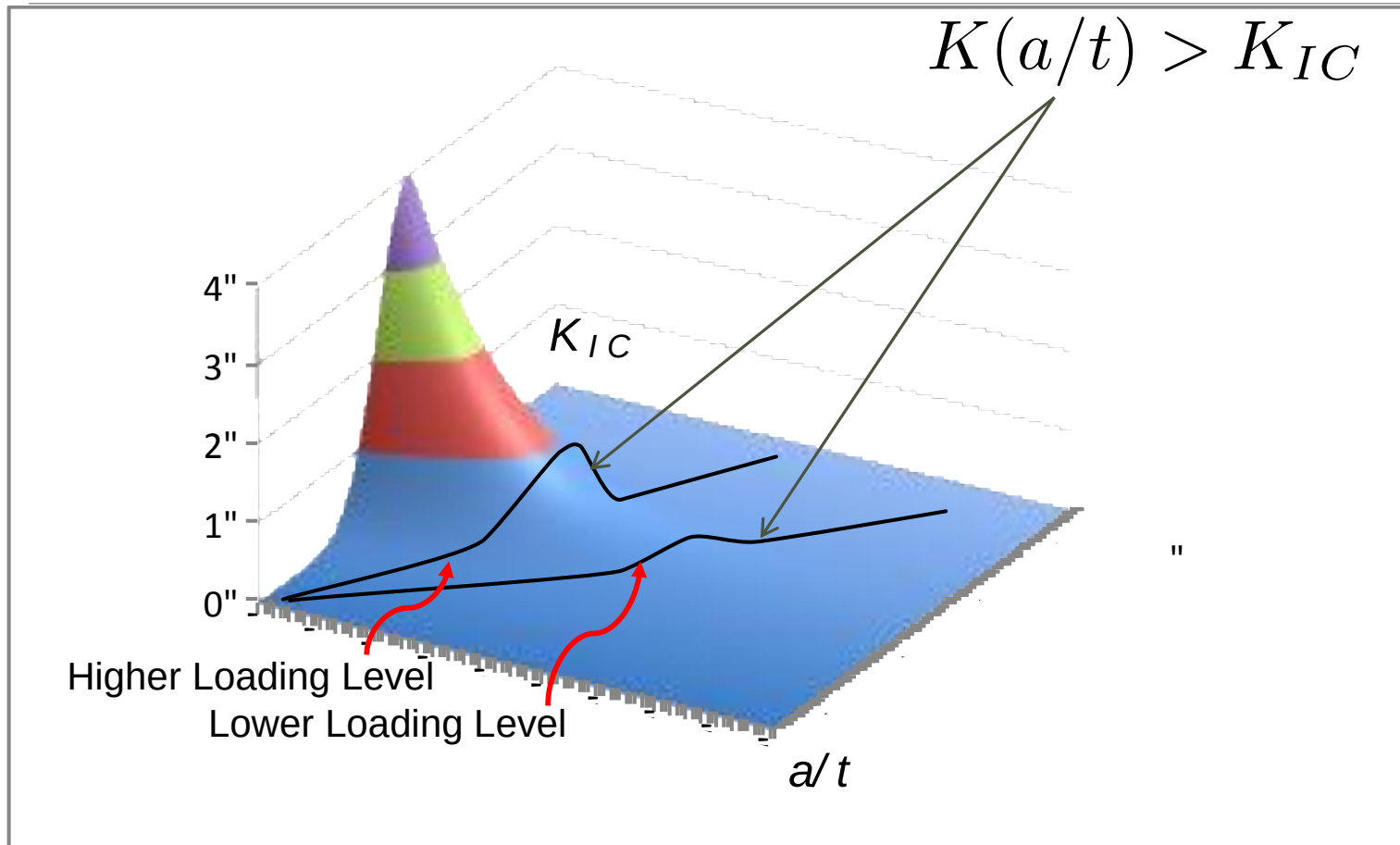
$\log N_f$

破壊確率

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



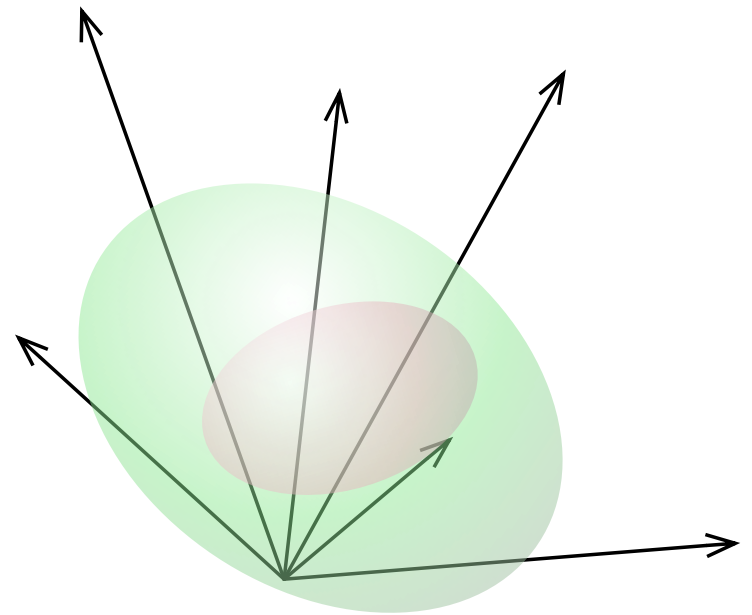
破壊確率



多次元確率空間

関連因子

- 材料組成(Cu, Ni)
- 亀裂サイズ
- 中性子照射量
- 荷重
- 破壊靱性値
- 温度
- etc.



Monte Carloシミュレーション

多次元空間での数値積分法

$$P(x > c) = \int_c^{\infty} f(x) dx$$

$$P(x > c) = \int_{-\infty}^{\infty} I_c(x) f(x) dx$$

$$I_c(x) = \begin{cases} 1 & (x > c) \\ 0 & (x \leq c) \end{cases}$$

$$P(x > c) \cong \frac{\sum_{i=1}^N I_c(x_i)}{N}$$

MC 法の誤差

$$P = \int_c^\infty f(x)dx \quad P_N = \frac{\sum_{i=1}^N I_c(x_i)}{N}$$

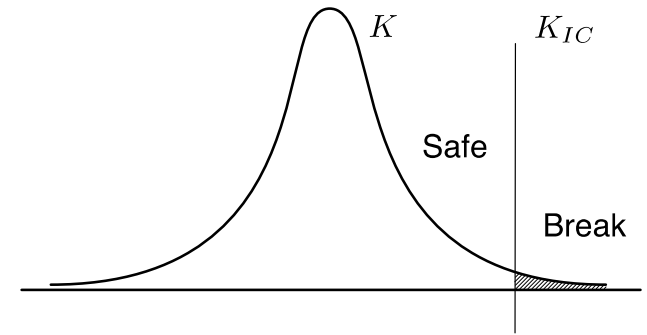
$$E_N = |P - P_N| < C \sqrt{\frac{\log \log N}{N}}$$

$$\frac{E_{1,000,000}}{E_{10,000}} \cong 0.109$$

層別サンプリング

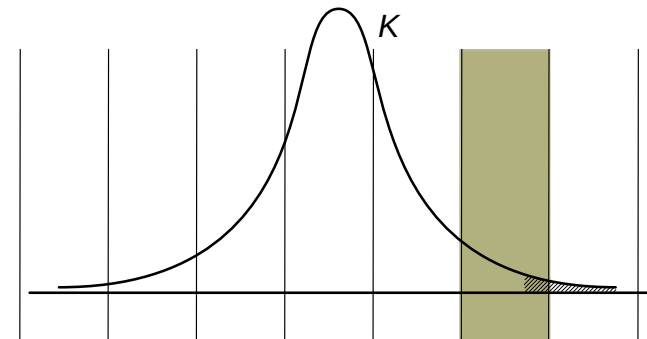
サンプリング点

- “Safe” 域には多数の点
- “Break” 域にはごく少数の点

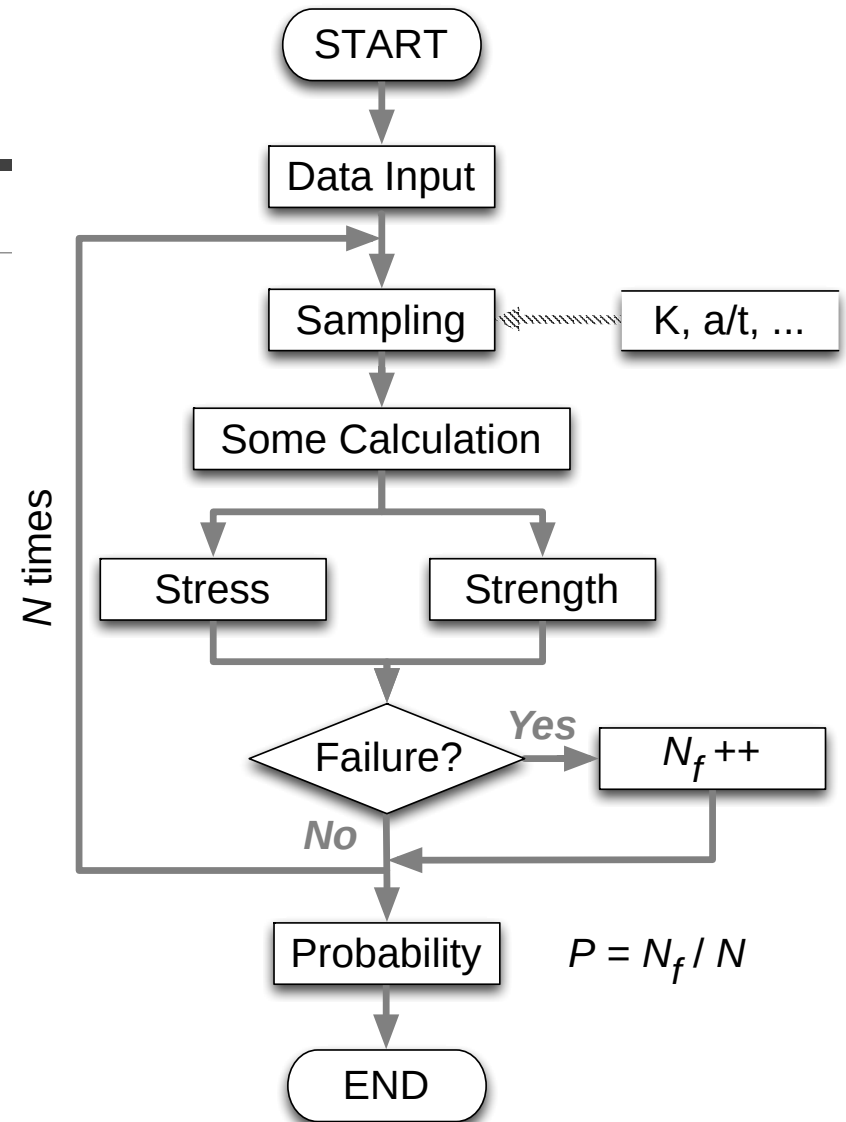


層別サンプリング

- 境界で多くのサンプリング点
- 他のエリアでは少数の点



PFM解析フロー



PASCAL Code

Fracture Probability Analysis by Monte Carlo Simulation

- PASCAL Ver. 3 is available at OECD/NEA Databank

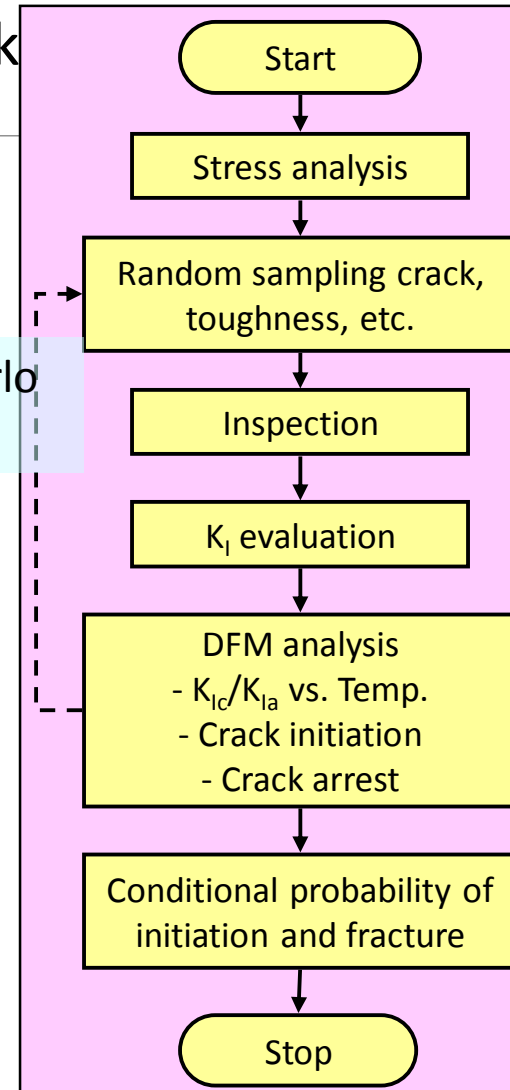
➤ ICAS PFM benchmark

Main Improvements

Geometry of crack

- Surface crack (Long & Circum)
- Embedded crack
- K_I calculation
- Influence function, ASME method, etc.
- Fracture toughness (initiation and arrest)
- IPTS (NRC) K_{Ic}/K_{Ia} , JEAC K_{Ic} (Normal)
- Master curve, ORNL Weibull-type
- Irradiation embrittlement
- Japanese equation, USNRC R.G.1.99 r2
- ASTM E900, NUREG

Monte Carlo
simulation



主要なPFMソフト

from JWES PFM Book

Name	Developer	Target	Remark
PASCAL3	JAEA, MRI	PV	PTS
PASCAL-SP	JAEA, MRI	Pipe	SCC
PASCAL-EC	JAEA, MRI	Pipe	Thinning
MSS-REAL	JAEA, JRI	FBR	Creep-Fatigue
PEPPER	Tepco Systems	Pipe	Linear/Non-Linear
PEPPER-M	Tepco Systems	Pipe	SCC
WinPRAISE	Eng. Mech. Tech.	Pipe	Seismic Load
FAVOR	ORNL	PV	PTS
SPEC	Tepco Systems	Pipe	MS Excel
Dr. Mainte	UT, JNFL, INSS, Allied Engineering	PV, Pipe and etc.	Economical Evaluation Integrated Simulator

PFM解析例

Round Robin Analysis

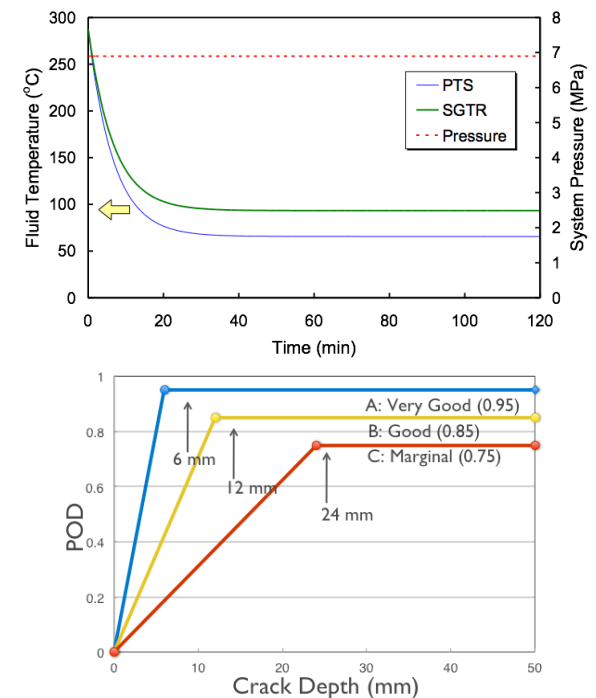
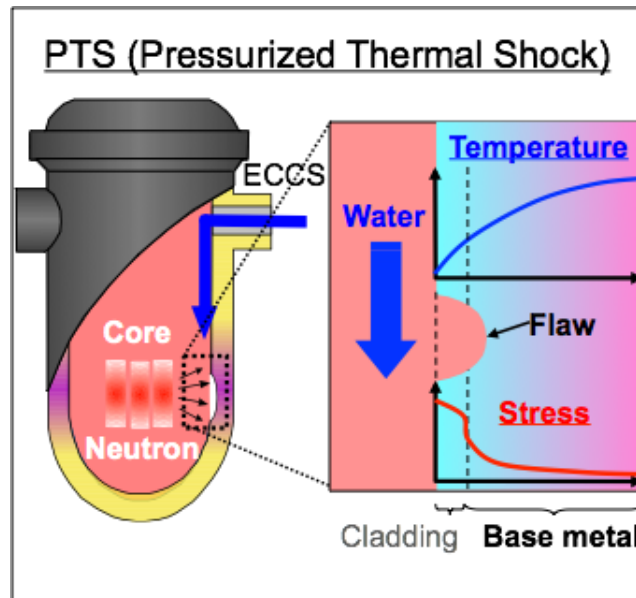
- Verification & Validation of Software
- Improvement of Method, Input Data ...

International RR program

- Exchange of Information

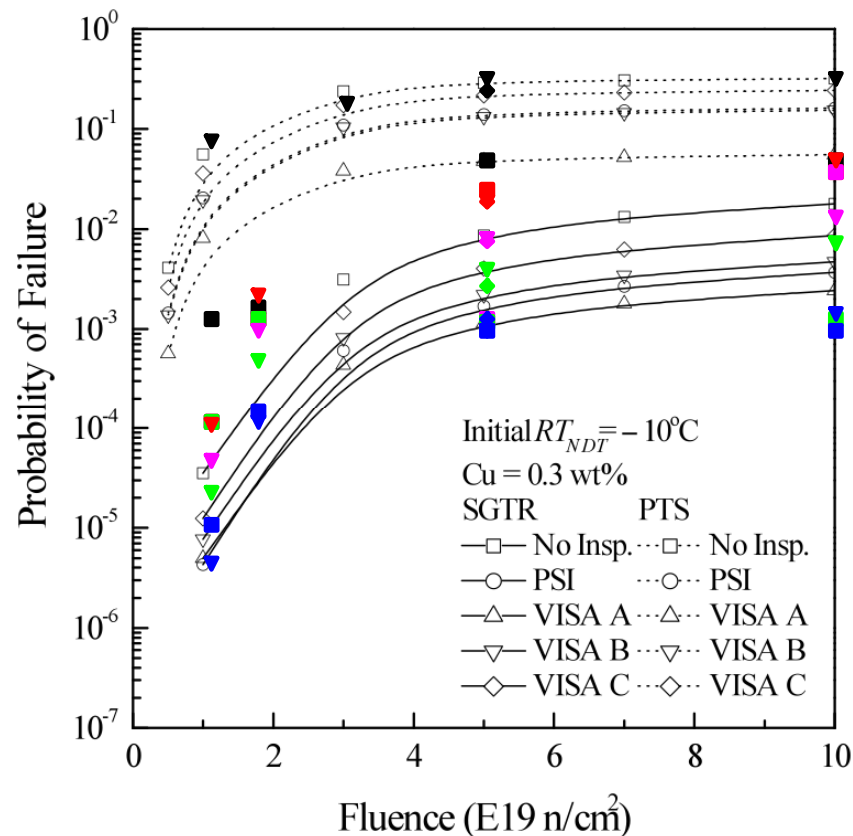
Problem of RR Analysis

- RPV failure probabilities with a single crack located inside of the belt line for PTS and SGTR transients
- Sensitivity analyses for inspection performance
- Sensitivity analyses for copper contents and initial RT_{NDT} , which effect fracture toughness



Results of RR Analysis

Effect of Inspection Performance



何に使えるのか？

確率の絶対値

- 規制など

破壊確率 $< 10^{-6}$ /year

確率の相対値

- 安全性の評価指標
- 設計の違い
- 保守方法の違い
- 決定論的基準の裕度評価

感度解析による
影響因子の絞り込み

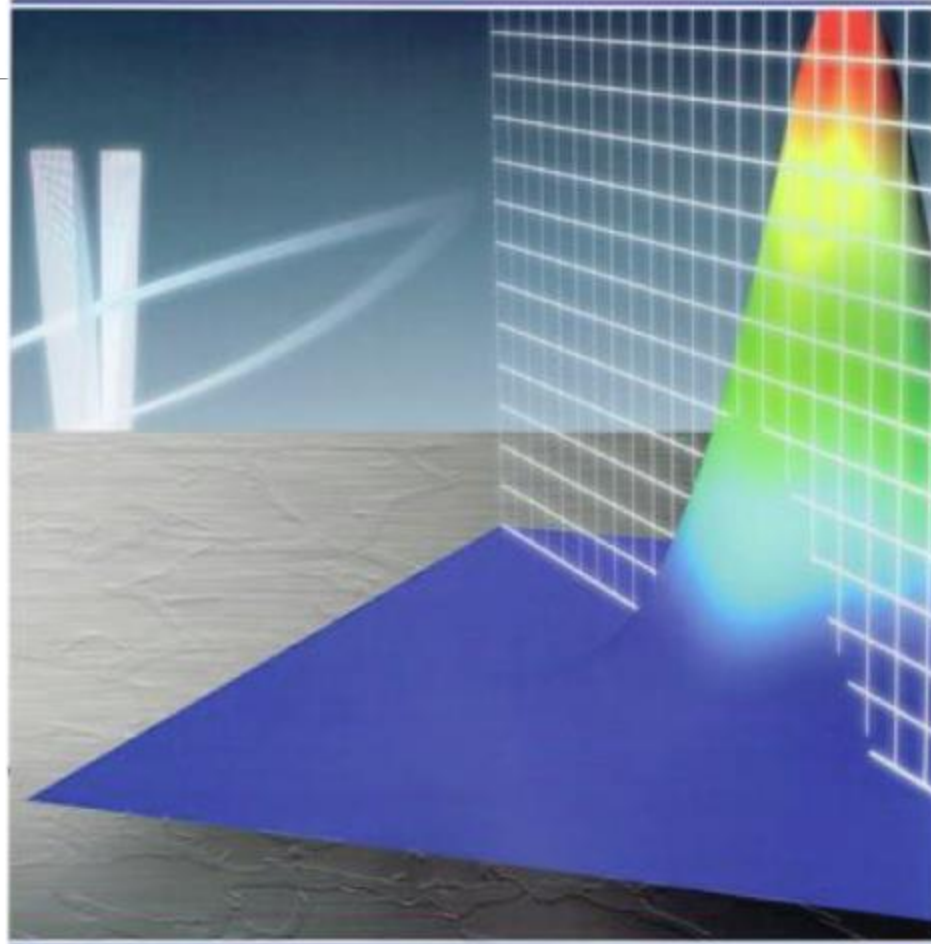
低精度検査/year or
高精度検査/5 years

維持規格の裕度評価
安全係数の評価

リスク活用のための 確率論的破壊力学技術

基礎と応用

吉村 忍・関東 康祐



一般社団法人 日本溶接協会

原子力研究委員会

PFM小委員会

PFM本

溶接協会PFM小委でまとめたチュートリアル
下記ページから無料ダウンロード可能

<http://www-it.jwes.or.jp/ae/index.jsp>

JWES-AE-1204

ISBN978-4-907200-00-8



リスク活用のための確率論的破壊力学技術
—基礎と応用— (ver.1.02)

Probabilistic Fracture Mechanics for Risk-Informed Activities
-Fundamentals and Applications-

平成24年12月 発行

ファイル容量:11.7MB
ページ数:433