

# 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 —日本機械学会における検討状況—

2015年11月23日

日本機械学会 発電用設備規格委員会  
原子力専門委員会 高温規格分科会  
浅山 泰

(日本原子力研究開発機構)

# 背景と内容

- 日本機械学会(JSME)発電用設備規格委員会において、高速炉規格を体系的に整備する活動が行われている。
- その中で、確率論的破壊力学が活用されている事例を紹介する。

# 高速炉規格の体系的整備

信頼性評価ガイドラインの整備

# JSME高速炉規格の整備

- JSME発電用原子力設備規格の一環として高速炉向けの規格を整備。
- 2005年に設計・建設に関する規格として設計・建設規格第II編高速炉規格(高速炉用の設計規格)の初版を発刊。その後逐次の改訂を経て現在に至る。
- 高速炉規格を所掌する発電用設備規格委員会原子力専門委員会高温規格分科会では、高速炉を対象とした一連の規格を体系的に整備する取り組みを進めている。

# 高速炉規格の開発

高速炉の特徴を最大限に活かす体系

軽水炉(参考)

JSME 材料規格

JSME設計・建設規格  
(第I編)

JSME 溶接規格

JSME 配管防護設計規格

JSME 維持規格

FBRの現状

材料強度基準  
(設計・建設に収録)

JSME設計・建設規格  
(第II編)2012年版\*

JSME 溶接規格 2010年版  
事例規格 高速炉溶接規格

整備すべき規格

材料強度基準  
(設計・建設に収録)

高度化

JSME設計・建設規格  
(第II編)

高度化

JSME 高速炉溶接規格

高度化

JSME 高速炉LBB評価規格

新規作成

JSME 高速炉維持規格

新規作成

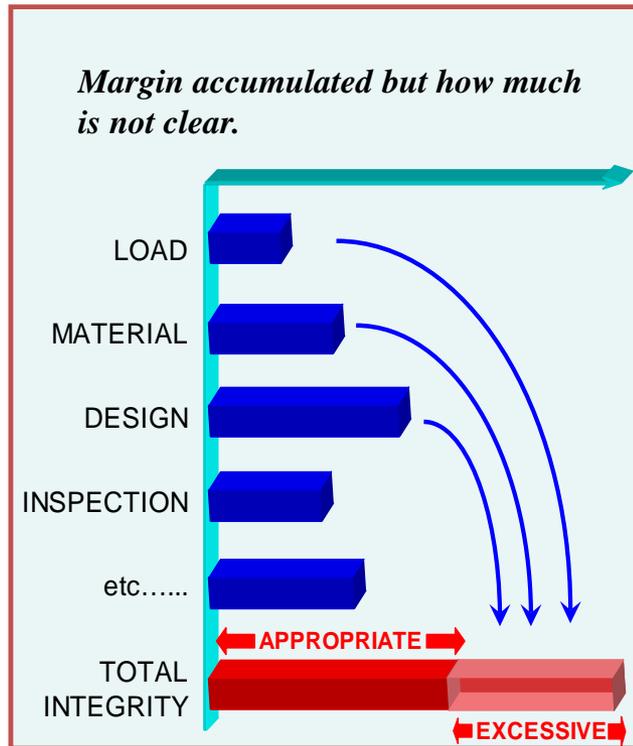
JSME  
信頼性評価ガイドライン

新規作成

# システム化規格概念に基づく体系化

- 高速炉用の規格体系の開発指導原理としてシステム化規格概念を採用。
- システム化規格概念は、①目標信頼性に基づく設計、②裕度交換、③技術的選択肢の拡大、を実現する規格体系。
- この概念を維持規格に適用すると、高速炉機器において、設計や運転上の裕度が十分で目標信頼性を上回る機器に対しては、一律に非破壊検査を要求するのではなく、機器の特性や信頼性に適合するより合理的な検査要求の設定が可能になる。

# システム化規格の概念



*Target reliability is determined first.*

- 規格基準に含まれる幾つかの技術項目の間で余裕を相互交換可能にすることにより、余裕の重複を避け、過剰な余裕を適正な水準に合理的に設定することを目標とする、柔軟な規格基準体系

# 確率論的破壊力学の必要性

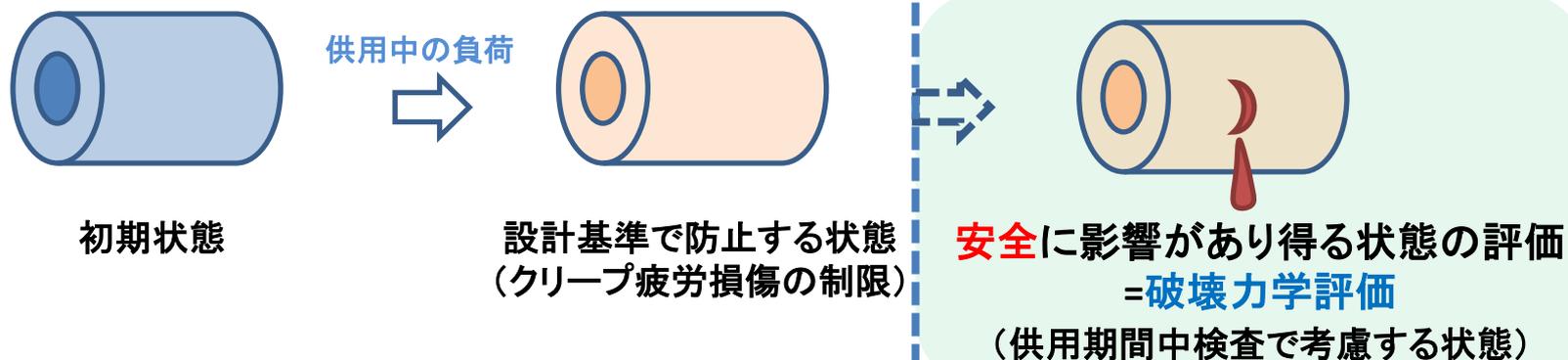
- **目標信頼性**等の表現方法は複数あり得るが、当面は定性的な判断基準を設けることが現実的。
- **将来的にはリスク評価(PRA)と連携**して機器の信頼性(破損確率)を用いて定める方法が有力。
- 機器の信頼性評価は、設計基準などで一般的に行われる、現象を保守的に包絡した評価ではなく、**き裂の発生や進展など、実際に機器で想定される破損現象**をできる限り模擬した評価を行うことが必要。
- よって、**確率論的破壊力学の活用が必須**。

●システム化規格で目指す枠組み:「目標信頼性に基づく設計や維持」



プラントの「安全」に係わる事象を「確率論的」に評価する

●安全に影響し得る事象の評価 (例: 配管、冷却材漏えいに関する評価)

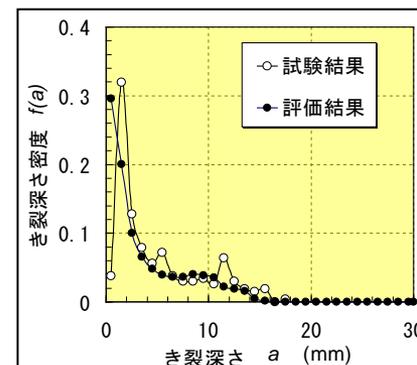


●確率論的破壊力学 (例: 厚肉円筒の亀裂の評価)

構造物試験の評価例  
ナトリウム温度差: 300°C  
繰返し数: 2000サイクル

A photograph of a thick-walled cylinder with a visible crack. A ruler is placed below it for scale, with the number 'NO1' visible.

Asayama, T., Taksho, H. and Kato, T., Probabilistic Prediction of Crack Depth Distributions Observed in Structures Subjected to Thermal Fatigue, ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 131 (2009) 011402-1



高速炉規格の体系的整備

信頼性評価ガイドラインの整備

# 技術の進展と標準化

- 高速炉機器で想定される破損現象をできる限り模擬した信頼性評価法が必要。
- 確率論的破壊力学の研究が進み、高速炉において防止すべき主要な破損モードの一つであるクリープ疲労に対しても必要な技術が整備されている
- 評価に必須の材料特性等に関する統計データも公開情報ベースで利用可能。
- 高温規格分科会では、高速炉の静的機器を対象とした標準的手法を定めることを目的として、信頼性評価ガイドライン(案)の整備を進めている。

# 破損の現象に即した評価

- 信頼性評価ガイドライン(案):「総則」、「信頼性評価」、「破損シナリオの設定」、「モデル化」及び「破損確率の算出」の五つの章および添付から構成。
- 非強制添付にはクリープ疲労損傷評価に関する詳細な手順を収録。基本的には高速炉設計規格に定める考え方をベースとし、同規格には陽に定めていないき裂の発生、進展、破壊に関する評価法を収録。
- 上記において**確率論的破壊力学を活用**。これにより、高速炉設計規格の考え方はそのままに、**破損の現象により即した評価が可能**。

# 高速炉機器の信頼性評価ガイドライン 目次案

## A 総則

- A-1000 目的
- A-1100 適用範囲
- A-1200 引用規格
- A-1300 対象材料
- A-1400 対象荷重
- A-1500 対象とする破損確率算定法
- A-1600 用語の定義

- B-3000 モデル化
- B-3100 概要
- B-3200 破損過程の定式化
- B-3300 限界状態関数の設定
- B-3400 変数の設定
- B-3410 荷重・応力
- B-3420 材料特性
- B-4000 信頼度の算出

## B 信頼性評価

- B-1000 信頼性評価の概要
- B-1100 信頼性評価の手順
- B-1200 破損シナリオの設定
- B-1300 モデル化
- B-1400 信頼度の算出
- B-2000 破損シナリオの設定
- B-2100 概要
- B-2200 限界状態の設定
- B-2300 評価期間の設定
- B-2400 破損モードの選択



### 添付B-1 破損シナリオの進展過程の定式化

- 添付B-1-1 クリープ疲労損傷による亀裂の発生
- 添付B-1-2 クリープ疲労による亀裂の進展

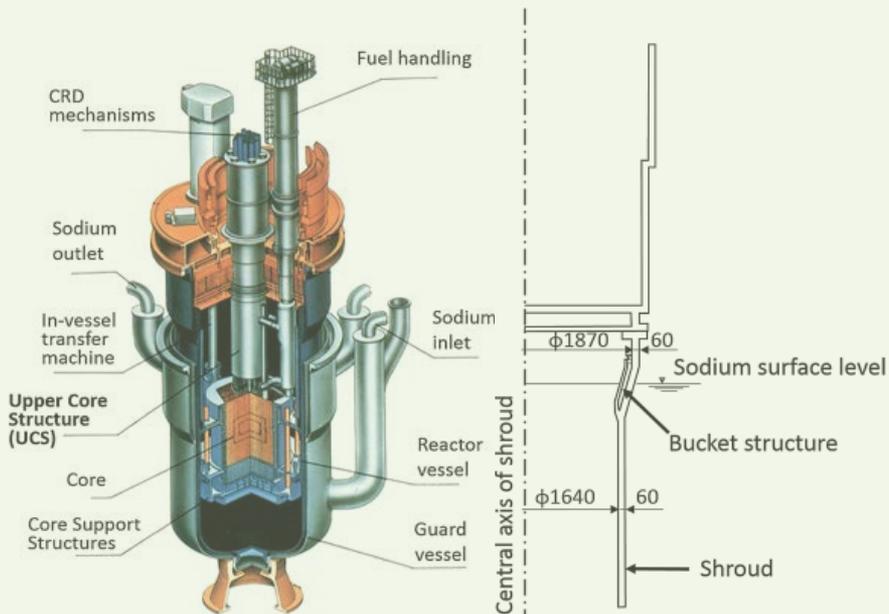
### 添付B-2 限界状態の定式化

- 添付B-2-1 亀裂の貫通
- 添付B-2-2 不安定破壊(塑性崩壊)
- 添付B-2-3 不安定破壊(延性破壊)

# 評価例と展開(1)

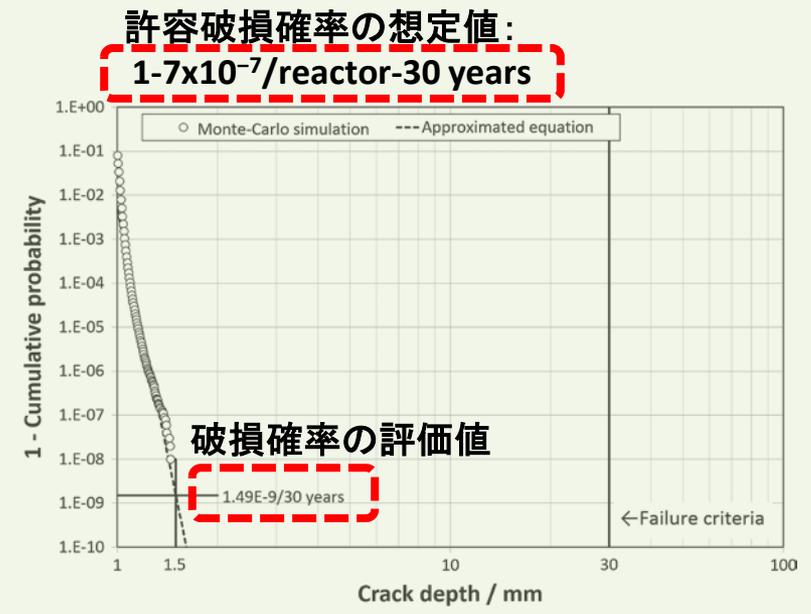
- 維持規格における供用期間中検査の要求の設定に資することを目的として、高速原型炉もんじゅの炉上部機構について、信頼性評価ガイドライン(案)に沿った評価を実施。
- 同機器の信頼性は仮想的に厳しい初期欠陥や荷重条件を想定しても、目標として想定できる値を十分上回る。
- 今後、このような評価が高速炉維持規格における検査要求の設定等に反映されることが期待される。

# 評価例と展開(2)



(a) 炉構造物

(b) 炉上部機構



炉上部機構の破損確率の評価値

もんじゅの炉容器と炉上部機構  
 (熱過渡荷重により生じるクリープ疲労き裂進展による破損確率の評価)

Takaya, S, Asayama, T., Kamishima, Y., Machida, H., Watanabe, D., Nakai, S. Morishita, M., Application of the System Based Code Concept to the Determination of In-Service Inspection Requirements, Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science January 2015, Vol. 1 / 011004-1

# 関連する活動(参考)

## ○ JSMEにおける他の動き

- JSME発電用設備規格委員会 原子力専門委員会 システム化規格タスク(2012年7月～)が活動中。軽水炉および高速炉を対象に、システム化規格概念を規格への導入するための検討を実施。
- 発電用原子力設備規格における信頼性ベースの評価に係るニーズの調査、技術的検討、課題の抽出および代替設計係数の設定方法に関する提案等。
- 報告書取りまとめ中。破壊評価に係わる限界状態関数も例示予定。
- タスクの成果に基づき信頼性評価を取り入れた規格策定が加速することが期待される。

## ○ 米国機械学会(ASME)における動き

- ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI Division 3(液体金属炉の供用期間中検査規格)に対するCode Caseをシステム化規格概念に基づき策定中。
- JSMEとASMEの共同組織として"JSME/ASME Joint Task Group for System Based Code"を設立(2012年)しCode Caseの原案を作成。
- Code Caseは、システム化規格概念に基づき、JSMEで策定中の高速炉維持規格案と整合する形で策定。高速炉機器の信頼性評価ガイドライン案のエッセンスを取込む。

# 結 言

- 日本機械学会で高速炉規格体系の整備中。
- システム化規格概念の具現化のために信頼性評価手法の標準化が必要。
- 信頼性評価においては実際の現象に即した評価が不可欠であり、確率論的破壊力学が必須。
- 今後、原子力界においてリスク情報の活用の枠組みが整備され、客観的に認められる形で目標信頼性を定めることができるようになれば、今まで以上に合理的な設計規格や維持規格が実現する。