

原子力安全部会主催 フォローアップセミナー

新型燃料の導入に向けた道筋  
安全評価技術の継続的向上の視点から

(3) 新型燃料に関する規制対応上の技術的課題

原子力規制庁 永瀬 文久

# 1. 緒言

BWR用10×10燃料を新たに国内に導入するにあたり、あらかじめ安全性を確認するための技術的課題を整理し、検討する必要がある。

規制庁では、規制対応のポイントとなると考えられる統計的安全評価手法について確認すべき技術的課題の検討を進めるなど、10×10燃料に関連する安全研究を行ってきた。

本資料は、それらについて紹介しつつ、見込まれる規制対応上の技術的課題について、私見をまとめたものである。

## 構成

2. 新型燃料導入において確認する項目
  - 2-1. 燃料の安全設計の考え方
  - 2-2. 統計的安全評価手法の導入にあたり確認すべき技術的課題
  - 2-3. 技術的課題に対応した規制庁の安全研究
3. まとめ

## 2. 新型燃料導入において確認する項目

### 2-1. 燃料の安全設計の考え方

- 新型燃料の導入にあたっては、燃料を含む原子炉施設の安全設計の妥当性を確認する必要がある。
- 規制基準及びその解釈、並びに、日本原子力学会(標準委員会システム安全専門部会)発行の報告書「発電用軽水型原子炉の炉心及び燃料の安全設計に関する報告書」に基づけば、
  - ・ 通常運転時の燃料棒内圧や被覆管外面腐食、水素吸収
  - ・ 運転時の異常な過渡変化時の被覆管歪や被覆管応力、ペレット中心温度、限界熱流束比、限界出力比
  - ・ 事故時の被覆管高温膨れ破裂、被覆管最高温度(PCT)、被覆管の化学量論的酸化量、長期冷却性維持が安全設計の妥当性を確認する際の評価項目の例として挙げられる。
- 事業者は、 $10 \times 10$ 燃料の申請に向けて整理が必要な事項として、燃料棒内圧基準への対応、沸騰遷移相関式の見直し、統計的安全評価手法の導入、反応度事故解析手法の高度化を挙げており<sup>1</sup>、これらも規制対応のポイントとなると考えられる。

1. 電気事業連合会,  $10 \times 10$ 燃料の導入及びトピカルレポート制度の活用について, 2019年4月4日, <https://www.da.nsr.go.jp/file/NR000121147/000267340.pdf>.

## 基準等の適用性確認

### 規則

- 実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則
- 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

### 内規

- 実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈
- 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

### 指針類(内規で参照しているもの等)

- 発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針
- 「燃料被覆管は機械的に破損しないこと」の解釈の明確化について
- 沸騰水型燃料の炉心設設計手法及び熱的制限値決定手法の適用について、等

## 2-2. 統計的安全評価(BEPU)の導入にあたり確認すべき技術的課題

## 従来評価の課題とBEPU

### ・安全解析における従来評価

- 原子炉の詳細な体系や複雑な現象を単純化・理想化したモデルを採用しており、**事故時の現実的な挙動を模擬できない。**
- 保守的なモデルや想定を用いているため、実機における事故時の**安全余裕を定量的に評価できない。**
- 解析結果に様々な保守性が含まれているため、事象進展や現象の解明、モデルの改良等の**最新知見を反映しても、解析結果への影響が小さい。**

### ・BEPUの導入

- 事故の事象進展や複雑な現象を**現実的に予測する最適評価コード**を使用。
- 入力パラメータの不確かさを考慮し、事故時の事象進展や安全評価パラメータについて**現実的に取り得る幅を統計的に評価する。**
- 実機の**安全余裕の定量評価**やこれを踏まえた**改善点の検討**が期待できる。
- 米国では、まずLOCA<sup>1</sup>、次にLOCA以外の事象<sup>2</sup>に導入されている。

1. U.S. NRC, Title 10, Part 50, of the Code of Federal Regulations, Section 50.46 (10 CFR 50.46) and Appendix K, 1988

2. U.S. NRC, Regulatory Guide 1.203, Transient and Accident Analysis Methods, December 2005

# BEPUの概要

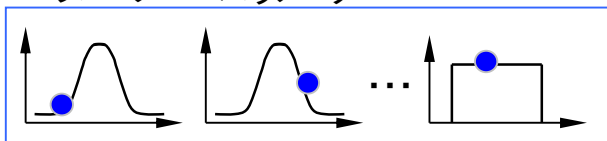
不確かさを考慮する重要パラメータを同定  
(物理モデル、初期条件、境界条件等のパラメータ)

入力パラメータの不確かさを定量化

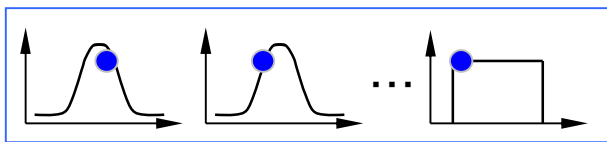
入力パラメータのサンプリング

核モデル  
パラメータ    燃料熱伝導  
パラメータ    ... 初期出力等

1回目の計算

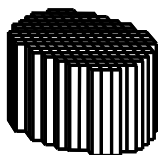


n回目の計算



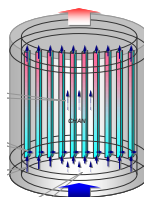
● : 分布に従いサンプリング

最適評価コードで多数の計算を実施

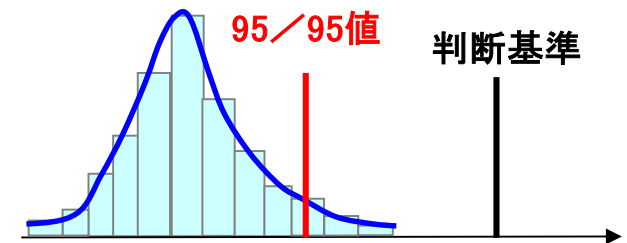


領域毎の  
出力分布

ポイド分布  
燃料温度



安全評価パラメータの確率密度分布



統計手法を用いた95/95値の評価

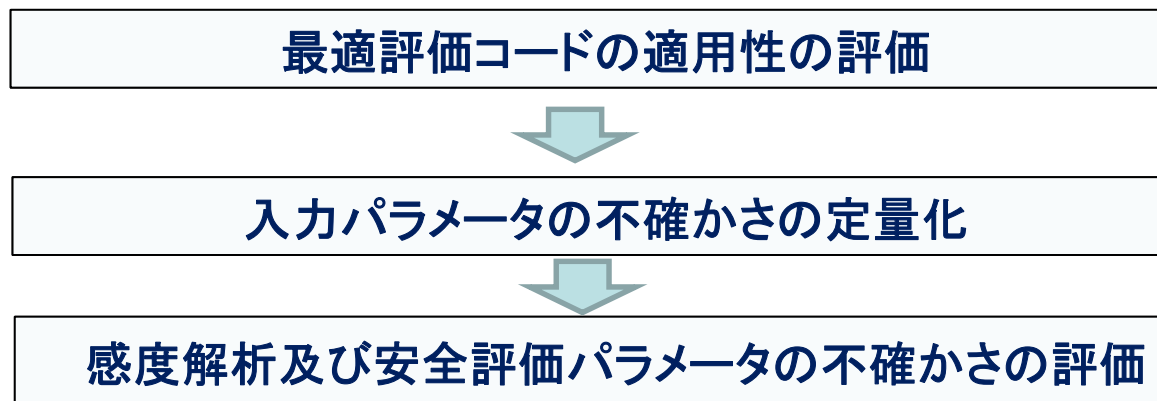
判断基準と比較

**95/95値**: 95%の信頼水準を持った95%累積確率値  
**信頼水準**: サンプルの母集団に対する一致度を示す指標  
**累積確率**: 判断基準を満足する確率を示す指標

# BEPUの実施基準

- ・ 日本原子力学会標準の統計的安全評価の実施基準<sup>1</sup>
  - BEPU適用における具体的な評価手順を定めている。
  - 規定の補足やBEPU適用例(PWR及びBWR)を参考として提示している。
  - 改定版では特に最新知見を反映して付属書(参考)を拡充<sup>2</sup>。

## BEPUの具体的な評価手順



1. 統計的安全評価の実施基準:2008, 社団法人日本原子力学会, AESJ-SC-S001:2008, 2009年5月.

2. 統計的安全評価の実施基準:2021, 一般財団法人日本原子力学会, AESJ-SC-S001:2021, 2022年3月.



# BEPUの各手順について確認すべき課題

## 統計的安全評価の実施基準における手順

### ● 最適評価コードの適用性の評価

- 事象及び原子炉の選定 (Step1-2)
- 現象重要度ランクテーブル(PIRT)の作成 (Step 3)
- 最適評価コードの選定とその適用性の評価 (Step 4-6)

### ● 入力パラメータの不確かさの定量化

- 評価マトリックスの作成 (Step 7)
- 解析モデル(ノード分割)の設定(Step 8)
- 解析コード又はモデルの不確かさの評価 (Step 9)
- スケール効果の評価(Step 10)

### ● 感度解析及び安全評価パラメータの不確かさの評価

- 入力データ(解析条件等)の不確かさの定量化(Step 11)
- 感度解析を実施し、重要な入力パラメータを確認 (Step 12)
- 安全評価パラメータの不確かさの統計評価 (Step 13-14)

## 確認すべき重要な技術的課題

- PIRTの妥当性
- 最適評価コードとその適用性

- 評価マトリックスで選定された**実験等**
- 不確かさを考慮する**モデル等の選定**
- **モデル等の不確かさ(分布関数等)**
- **スケール効果(スケール歪)**

- 不確かさを考慮する**入力データの選定**
- 入力データの**不確かさ(分布関数等)**
- 安全評価パラメータの不確かさの**統計評価方法**(サンプリング法、統計処理手法等)
- **統計評価結果の妥当性**

## 2-3. 技術的課題に対応した安全研究

# BEPUに関する規制庁の安全研究

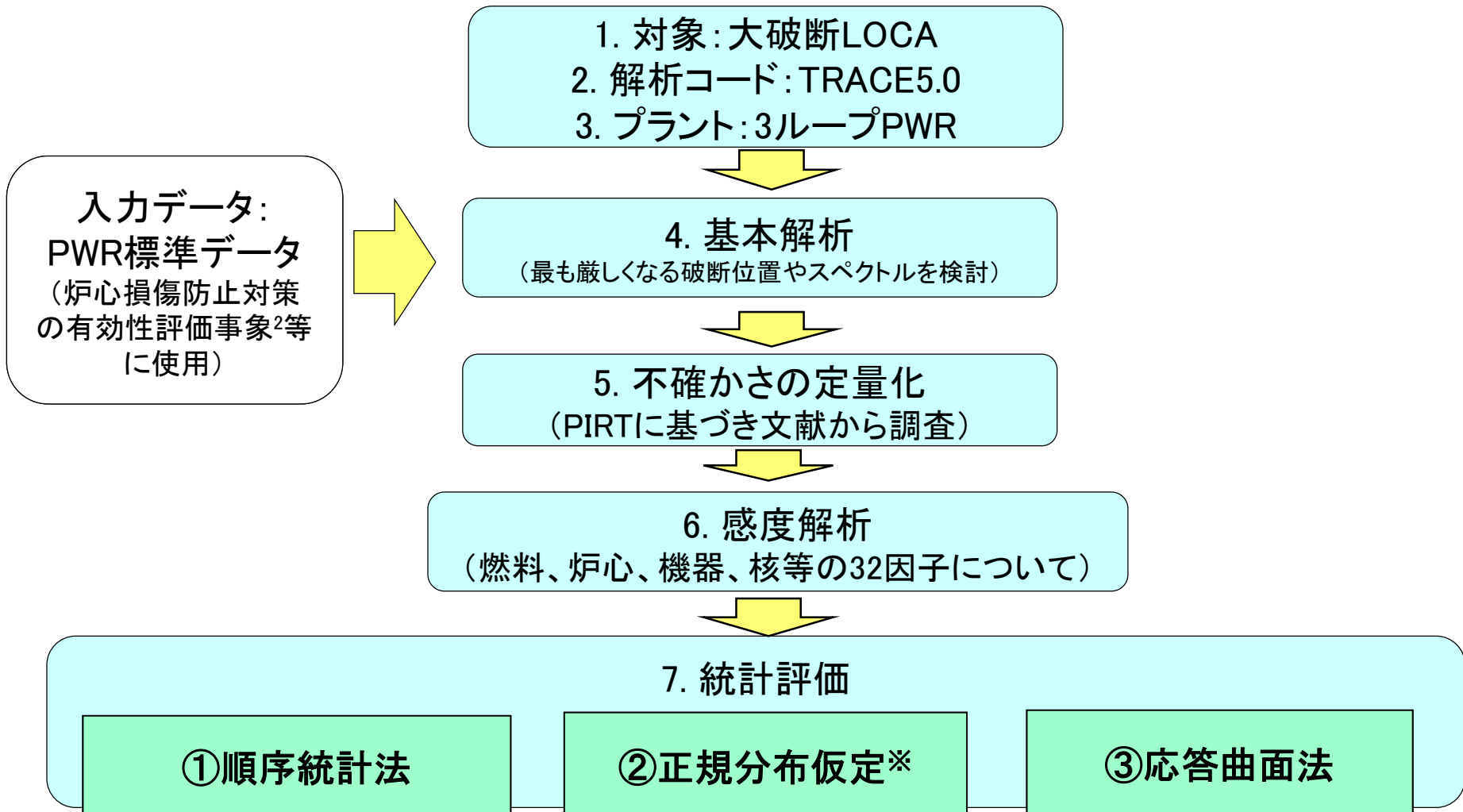
規制庁では、BEPUが導入された場合に確認すべき重要な技術的課題について検討するため、関連研究を実施してきた。

- ・ 最適評価コードを用いた解析手法の整備
  - 米国NRCからのTRACEコード等の導入やAMAGIコードの開発。
  - BWR及びPWRを模擬する標準入力データの整備。
- ・ 実機の事故事象へのBEPUの適用
  - BWRの負荷遮断や給水加熱喪失への適用<sup>1</sup>。
  - PWRの大破断LOCAへの適用(次頁以降で説明)。
- ・ OECD/NEA/CSNI/WAGMAのBEPUタスク<sup>2</sup>の最新知見の収集
  - BEMUSE: 大破断LOCAを対象としたBEPUのベンチマーク評価を実施。
  - PREMIUM及びSAPIUM: 逆解法を用いた不確かさの定量化手法を検討。
  - ATRIUM: 同不確かさ定量化手法を用いたベンチマーク評価を実施中。

1. R. Ichikawa et al., Statistical Safety Evaluation of BWR Turbine Trip Scenario Using Coupled Neutron Kinetics and Thermal Hydraulics Analysis Code SKETCH-INS/TRACE5.0, Proceedings of ICON19, May 16-19, 2011, Chiba, Japan (2011)

2. [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_23462/working-group-on-analysis-and-management-of-accidents-wgama](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_23462/working-group-on-analysis-and-management-of-accidents-wgama)

# PWR大破断LOCAのBEPU適用<sup>1</sup>



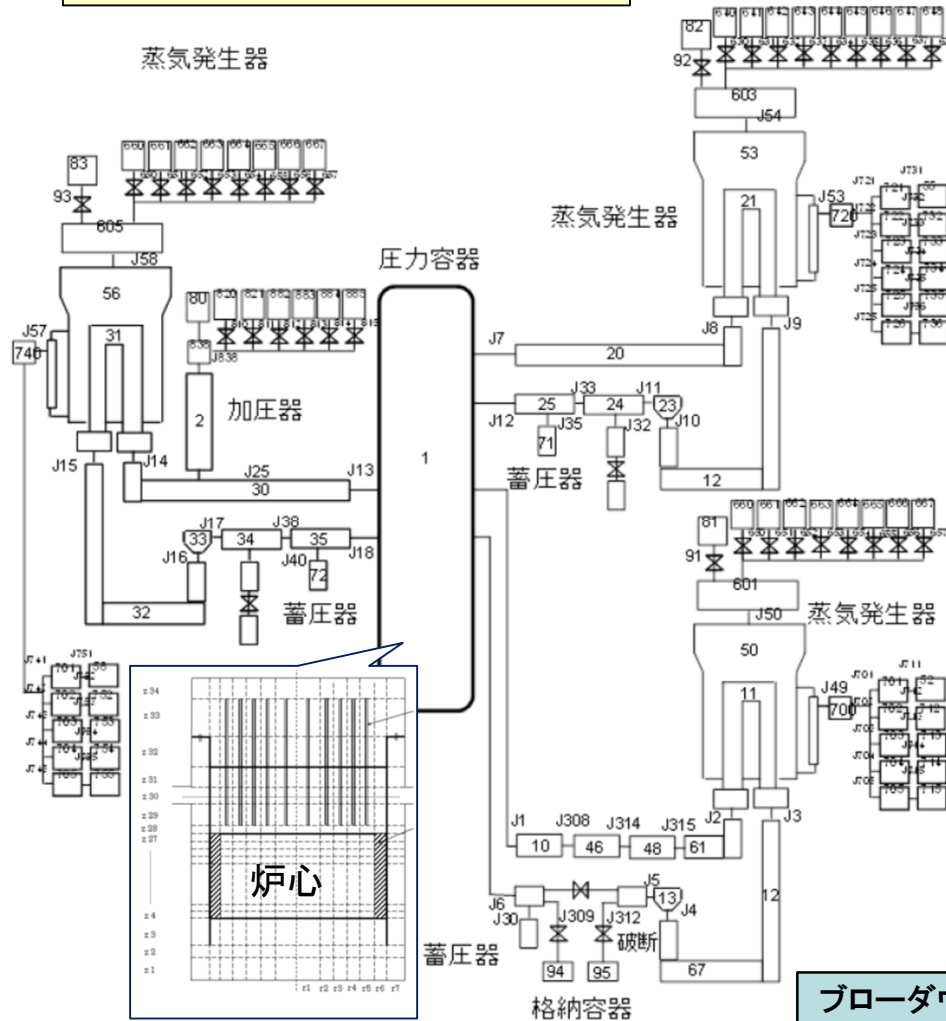
※ ①と同じ少数サンプルにおいて95%累積確率を抽出した参考評価

1. 江口ら, 安全研究成果報告 詳細解析手法の導入に向けた熱流動・核特性安全解析手法の整備(Phase-2), 原子力規制庁長官官房技術基盤グループ, RREP-2019-1002, 平成31年3月.

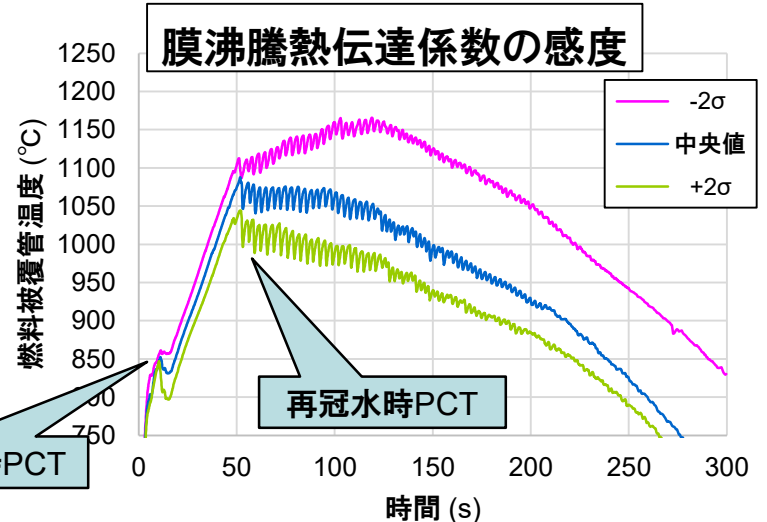
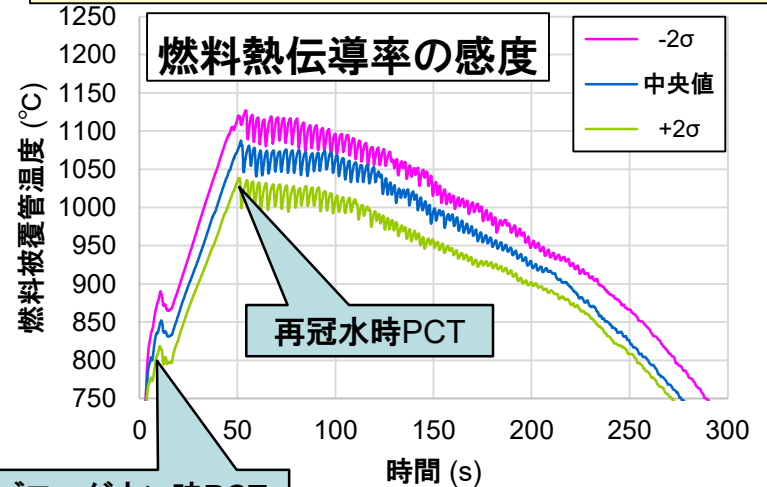
2. NRA技術報告 炉心損傷防止対策の有効性評価事象の分析(PWR), 原子力規制委員会, 平成26年8月.

# TRACE5.0によるPWR大破断LOCA解析

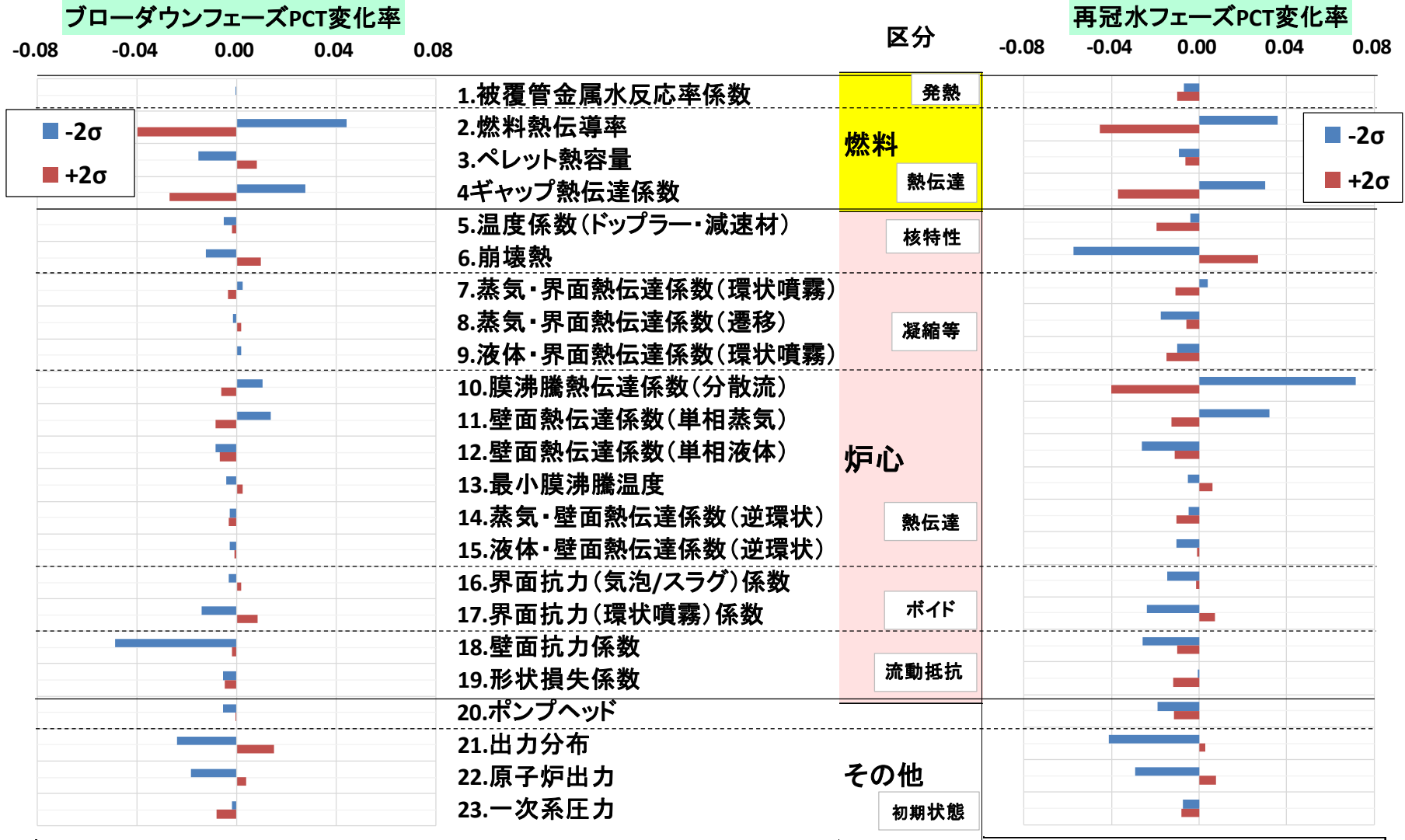
## PWRを模擬した解析体系



## 解析結果の例(燃料被覆管温度)



# 重要なモデル及び入力データの感度検討

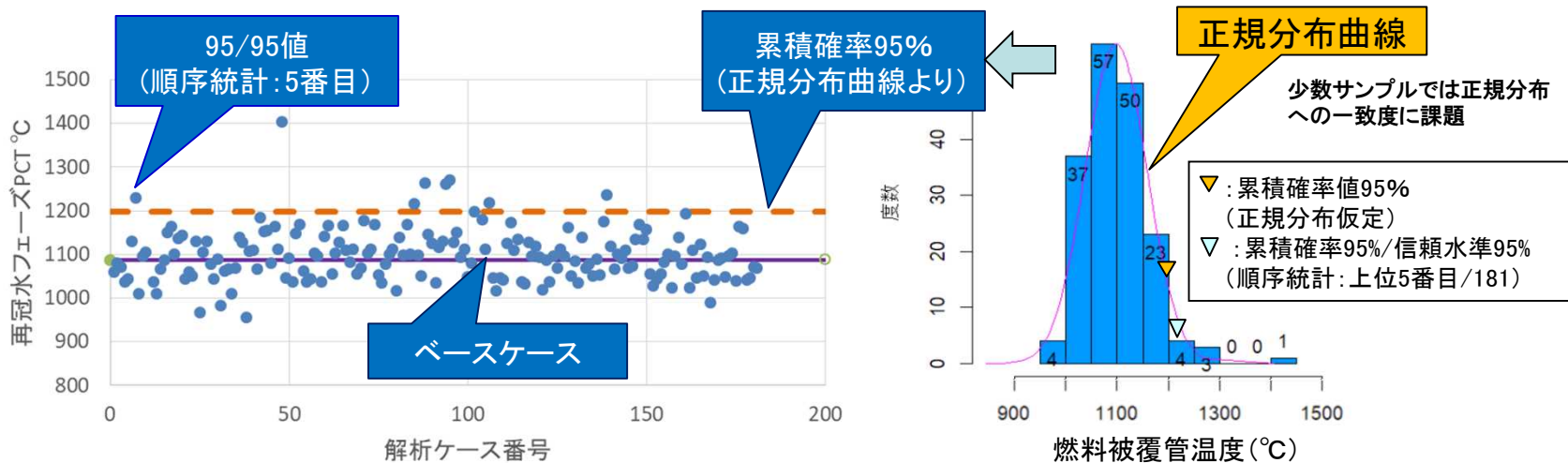


不確かさを考慮するモデル等の選定が課題 → PCTに影響するモデル等を確認



# 統計評価方法の影響検討

統計評価方法	95/95値の評価方法	計算法	サンプリング法
順序統計法	Wilksの式に基づく (例: 試行181回⇒5番目の値)	TRACEで計算 (124、153、181回)	ラテン・ハイパーキューブ・ サンプリング法
正規分布仮定	近似した正規分布曲線について 上位5%値(下記参照)	同上	同上
応答局面法	直接処理法: 上位5%番目の値	TRACE結果から作成した多項式 近似関数で計算(100万回等)	モンテカルロ法



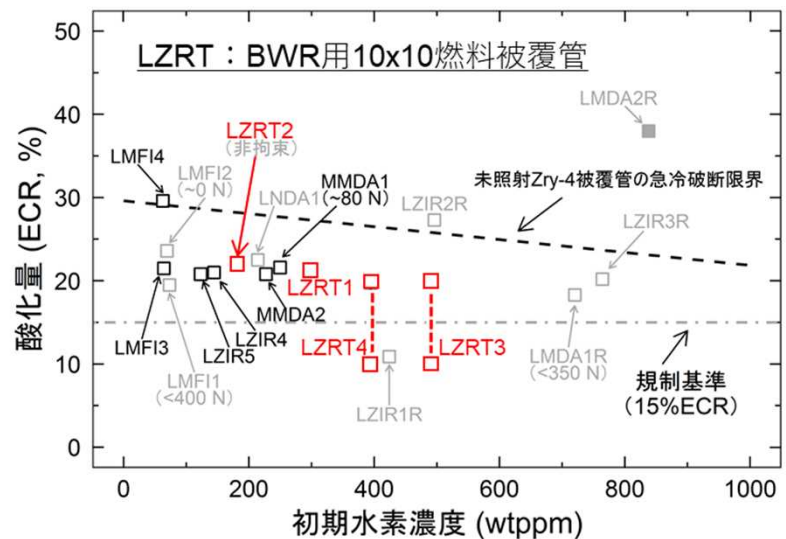
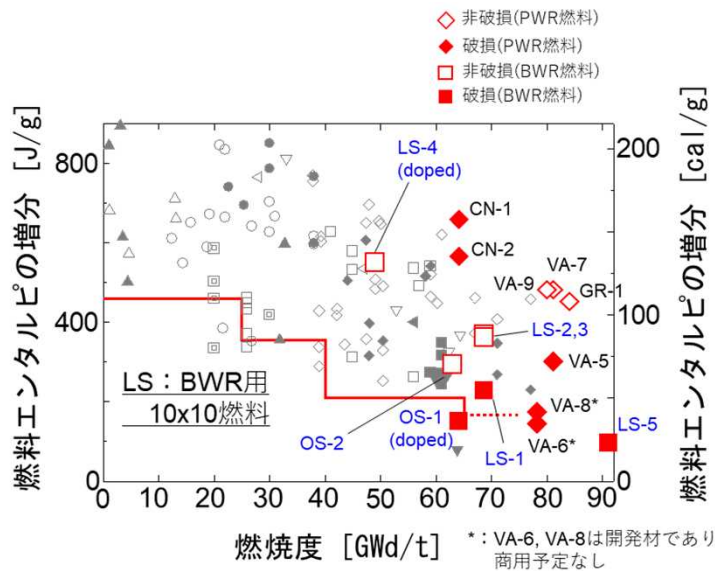
本検討では、順序統計法>正規分布仮定>応答局面法の順にPCT(95/95値)を高めめに評価した

不確かさの統計評価方法が課題 ➡ 統計評価方法による95/95値への影響を確認

# 10×10燃料に関するその他の安全研究の例

## ・ JAEAが行ったDBA条件での燃料挙動に関する研究

- 欧州の発電炉で照射された10x10燃料(局所燃焼度49~91GWd/t)の入手
- NSRRを用いたRIA時破損限界に関する研究(左図)
- 燃料試験施設におけるLOCA時破損挙動に関する研究(右図)





### 3. まとめ

10×10燃料の導入にあたっては、燃料を含む原子炉施設の安全設計の妥当性を確認する必要がある。規制庁では、その安全評価に関し、BEPUを適用した場合に確認すべき技術的課題の抽出や、欧州照射燃料を用いたRIA、LOCA時燃料挙動評価に関する安全研究を実施している。