

安全部会企画セッション  
「次世代の研究動向と継続的な安全研究展開のあり方」

# リスク情報を活用した合理的な意思決定に向けた PRA手法の高度化に関する研究

成川 隆文

東京大学 大学院工学系研究科  
原子力国際専攻

# リスク情報を活用した意思決定

大規模複雑システムのリスクマネジメントに係る意思決定には、不確かさを明示的に扱えるPRA\*から得られるリスク情報の活用が有効

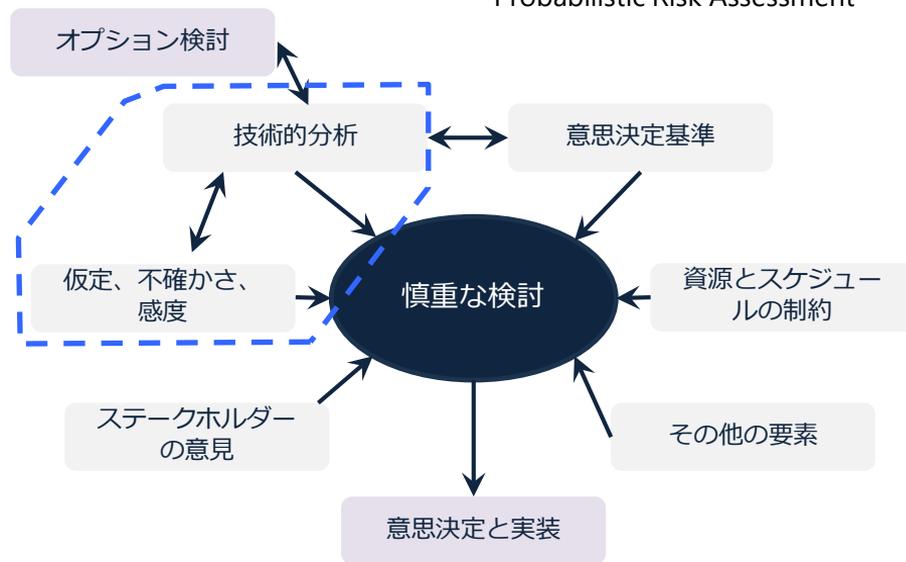
\*Probabilistic Risk Assessment

## 確率論的リスク評価 (PRA)

- ✓ 網羅的シナリオ評価
  - ・ システムアプローチ
  - ・ 最適評価モデル
  - ・ 信頼性解析
- ✓ 脆弱性の評価
- ✓ ヒューマン-システムインタラクション
- ✓ 現実的評価

## リスク情報

- ✓ シナリオ
- ✓ 頻度
- ✓ 影響
- ✓ 時間
- ✓ 重要度
- ✓ 認識論的不確かさ



リスクマネジメントの意思決定で考慮すべき要素

(USNRC, NUREG-2150を基に作成)

# 合理的な意思決定に向けた課題認識とPRA高度化方針

## 現実性の向上

### 課題認識

プラント応答解析は精緻化される一方、許容限界側は決定論的・保守的。

### 高度化方針

- ✓ 不確かさを考慮した炉心損傷判定基準の最適評価法の開発\*
- ✓ 事故耐性燃料(ATF)被覆管破損限界評価†

## 確率論的リスク評価 (PRA)

- ✓ 網羅的シナリオ評価
  - システムアプローチ
  - 最適評価モデル
  - 信頼性解析
- ✓ 脆弱性の評価
- ✓ ヒューマン-システムインタラクション
- ✓ 現実的評価

## リスク情報

- ✓ シナリオ
- ✓ 頻度
- ✓ 影響
- ✓ 時間
- ✓ 重要度
- ✓ 認識論的不確かさ

## リスク情報の多様化

### 課題認識

重要度評価は頻度のみに基づいている。

### 高度化方針

動的PRAにおけるリスク重要度評価手法の開発‡

## 評価の信頼性の向上

### 課題認識

稀有事象や実験コストの高い事象のように、データが限られた事象のリスク評価には大きな不確かさが伴う。

### 高度化方針

- ✓ 認識論的不確かさ低減手法の開発\*
- ✓ モデル不確かさの定量化手法の開発†

\* 東大高田研の取り組み

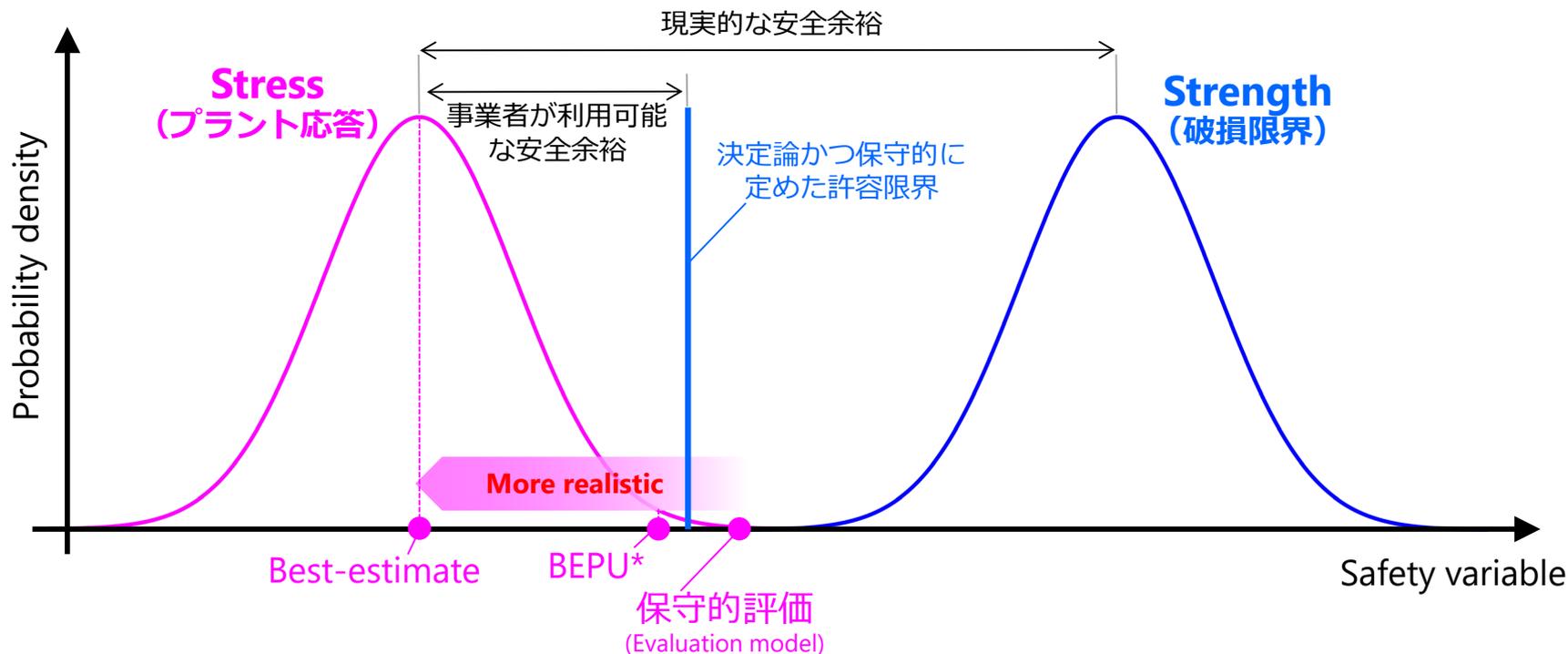
† JAEA安全研究センター燃料安全研究Grにおける研究

‡ 東大高田研とJAEA安全研究センターとの共同研究

# 不確かさを考慮した炉心損傷判定基準の 最適評価法の開発\*

# PRAの現実性の向上に向けた課題

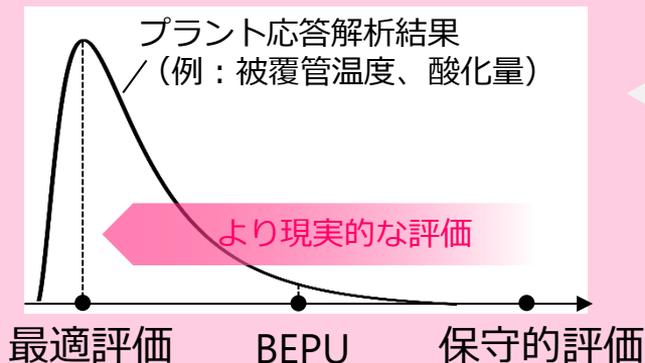
- Stress（プラント応答）側の評価が精緻化される一方、Strength（許容限界）側の評価は依然として決定論かつ保守的に定められた基準に依拠している。



# PRAの炉心損傷判定における不均衡

## プラント応答の評価

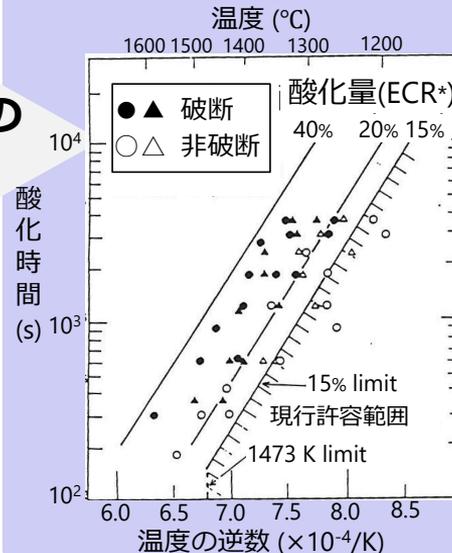
不確かさを考慮した最適評価  
(BEPU) により精緻化



評価精度の  
不均衡

## 許容限界の評価

決定論的かつ保守的に定められた  
燃料棒の破断限界に依拠



炉心損傷判定基準  
の根拠となる  
LOCA+模擬試験  
データ

(Furuta et al., ASTM STP824 (1984).)

\*Equivalent Cladding Reacted  
+Loss-Of-Coolant Accident

課題

評価の不均衡解消と精度向上

許容限界の評価にもBEPUアプローチを適用し、  
より現実的な炉心損傷判定法を開発する。

# 確率論的破断判定法の概要

## ● プラント応答の評価

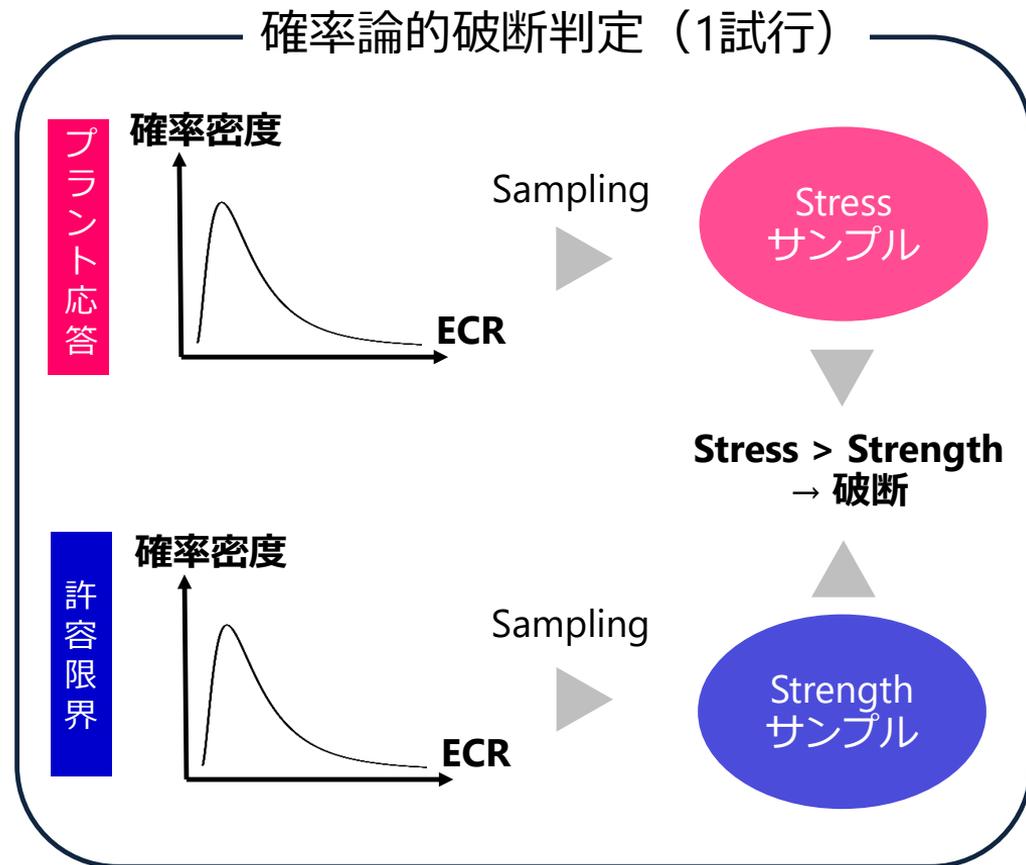
- LOCAシナリオのBEPU解析と  
ベイズモデリングによる  
燃料被覆管酸化量 (ECR) の  
確率分布評価

## ● 許容限界の評価

- 独自に開発したLOCA時燃料棒  
破断の最適評価モデル\*により  
破断に至るECRの確率分布を評価

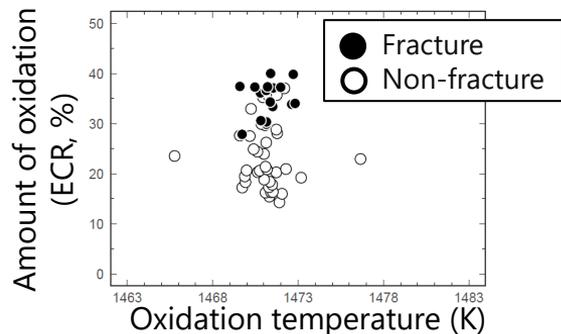
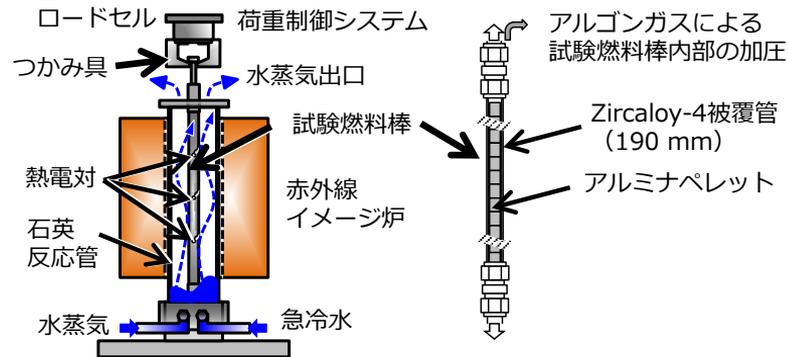
## ● 破断判定

- Stress-Strengthモデルを適用し、  
モンテカルロ法により  
破断確率を推定



# LOCA時燃料棒破断の最適評価モデル\*

\*Narukawa T. et al., JNM, 499, 528–538 (2018).

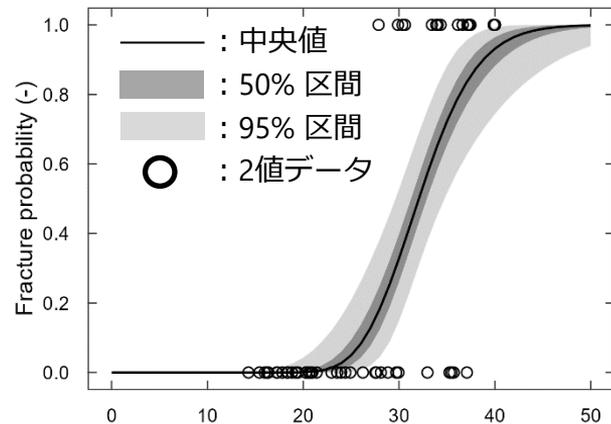


LOCA模擬試験の概要

Log-probit 2値データ (破断=1, 非破断=0)

$$Y_i \sim \text{Bernoulli}(P_{LP}(Y_i = 1 | X_i)) \quad \text{破断確率}$$

$$P_{LP}(Y_i = 1 | X_i) = \Phi\left(\frac{\beta_{LP0}}{\text{標準正規累積分布関数}} + \frac{\beta_{LP1}}{\text{未知係数}} \log \frac{X_i}{\text{ECR}}\right)$$



破断確率のベイズ予測分布

# 従来の破断判定法との比較

	従来法	確率論的破断判定法
プラント 応答評価	<b>点推定</b> (BEPU解析結果に対し、順序統計法で 95/95上限値を推定)	<b>不確かさを含む確率分布</b> (BEPU解析結果に対し、ベイズ推定)
許容限界 評価	<b>決定論的かつ保守的基準</b> (15%ECR)	<b>不確かさを含む確率分布</b> (最適評価のベイズモデル)
破断判定	<b>決定論的判定</b> (95/95上限値 > 判定基準)	<b>破断確率評価</b> (Stress-Strengthモデルとモンテカルロ法)
BEPU- LOCA解析* への適用	<b>判定結果：破断</b> 〔・ 95/95上限値 (ECR, %) : $36.5 \pm 11.6$ 〕	<b>判定結果：破断確率15.1%</b> 〔・ 95/95上限値 (ECR, %) : $28.2 \pm 2.5$ (cf. データからの直接推定 : 26.4%) ・ 15%ECRの破断確率 (%) : $2.0 \times 10^{-5}$ 〕

プラント応答側と許容限界側との**評価の不均衡を解消**することで、  
保守性を排除したより**現実的な炉心損傷判定（破断判定）が可能**に。

# リスク情報を活用した合理的な意思決定に向けたPRA手法の高度化に関する研究のまとめ

## 現実性の向上

- ✓ 確率論的燃料棒破断判定法を開発。
- ✓ プラント応答側と許容限界側との**評価の不均衡を解消**し、保守性を排除したより**現実的な炉心損傷判定（破断判定）が可能**に。

## 確率論的リスク評価（PRA）

- ✓ 網羅的シナリオ評価
  - システムアプローチ
  - 最適評価モデル
  - 信頼性解析
- ✓ 脆弱性の評価
- ✓ ヒューマン-システムインタラクション
- ✓ 現実的評価

## リスク情報

- ✓ シナリオ
- ✓ 頻度
- ✓ 影響
- ✓ 時間
- ✓ 重要度
- ✓ 認識論的不確かさ

## リスク情報の多様化

- ✓ リスク・トリプレットの観点から、動的PRAにおけるリスク重要度指標を開発。
- ✓ 従来の頻度の観点に加え、レジリエンス効果や影響緩和効果を考慮した**多面的なリスク重要度評価が可能**に。

## 評価の信頼性の向上

- ✓ 階層ベイズモデリング、及び情報量規準とベイズ更新による実験条件の最適化による認識論的不確かさ低減手法を開発。
- ✓ データが限られた場合にも、**信頼性の高いリスク評価が可能**に。

# 今後の安全研究のあり方

# 東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓

下線・太字は報告者による。

- 研究を実施する者は、自らが得意とする分野を深めようとするものである。一方、安全は多くの分野・領域の隙間から破綻する。俯瞰的な視点を維持して、研究計画を立案し、その成果を生かすことが重要。\*
- 欠けの見落としや優先順位の判断の誤り、現状を是とする態度、失敗を前提としてそれを積極的に見出し、迅速に手を打っていくという態度の欠如こそが問題である。これを克服するキーワードは、まさに「継続的な安全性向上」であろう。現在の規制体系を完成品とは考えず、常に、何らかの欠け（改善し、追加すべき事柄）を見出しうるものとして扱う、ということである。†
- 何を被害のエンドポイントと置くのか、どのような価値（生命、健康、財産、土地、コミュニティ、...）がどのような被害（放射線、非放射線、金銭的被害、...）から護られていることが重要か、という点から改めて議論し直す必要があろう。すなわち、安全確保活動の「深さ」（≒考慮すべきリスクの大きさの程度）のみならず、「広さ」（≒考慮すべきリスクの種類や対象範囲）についての社会的議論もまた重要である。‡

\*日本原子力学会 原子力安全部会、「福島第一原子力発電所事故に関するセミナー」報告書（2013）。

†原子力規制委員会 継続的安全性向上に関する検討チーム, 議論の振り返り（2021）。

‡弥生研究会 安全目標に関する研究会, 「安全目標」再考—なぜ安全目標を必要とするのか?—（2018）。

# リスク情報を活用した不確かさへの備え

- 俯瞰性の強化と安全の論理の欠けへの対処に向けて
  - シナリオ網羅性に優れるPRAから得られるリスク情報を活用し、重要度の高いシナリオ・事象のリスクを重点的に低減
  - このプロセスを通じて、安全研究を継続的に改善していくことが重要
- 次世代炉（高速炉、高温ガス炉）、小型モジュール炉、事故耐性燃料、等、新技術の導入に伴う潜在的なリスク評価対象の拡大を踏まえた研究展開
  - 運転経験の不足・欠如を補うための、シナリオ網羅性の更なる向上等のPRA手法の高度化
  - 多様な炉型・技術に対する評価の一貫性を確保するための意思決定基準の構築



PRAにおける不確かさの種類  
(USNRC, NUREG-1855 Rev. 1を基に作成)

# 規範的リスク分析によるフレーミングの再考

- 取り組むべき問題や課題の設定に見落としが無いのか、安全研究/リスク評価のフレーミングに立ち返って考えることが重要である。
  - － 現状のPRA（レベル3）は、主に電離放射線の直接的な影響に起因する公衆の個人の平均死亡リスクをエンドポイントとしている。このような評価からは、土地汚染や災害関連死等のリスクに対する備えは生まれない。
- フレーミングの再考は価値の議論と不可分であり、社会的議論の必要性が指摘されているものの、安全研究/リスク評価へのそうした議論の反映は十分に進んでいない。
- このような取組みを実効性のあるものとするには、社会が共有する規範の視点から、安全研究/リスク評価の妥当性（研究/評価の目的や目標だけでなく、その中身も含む）を、研究者自ら検証することが不可欠ではないか。
  - － 他分野の事例：公共政策分野の規範的政策分析\*、環境リスク分野の規範的リスク分析†
- 原子力分野では、基本安全原則等‡にみられるように、比例原則や防護の最適化、公平性、等の規範概念が共有されてきた。これらに基づき、電離放射線の直接的影響や個人の平均死亡リスクに射程を限定しない「規範的リスク分析」を実践することが、安全研究/リスク評価のフレーミングを再考する第一歩となるのではないか。

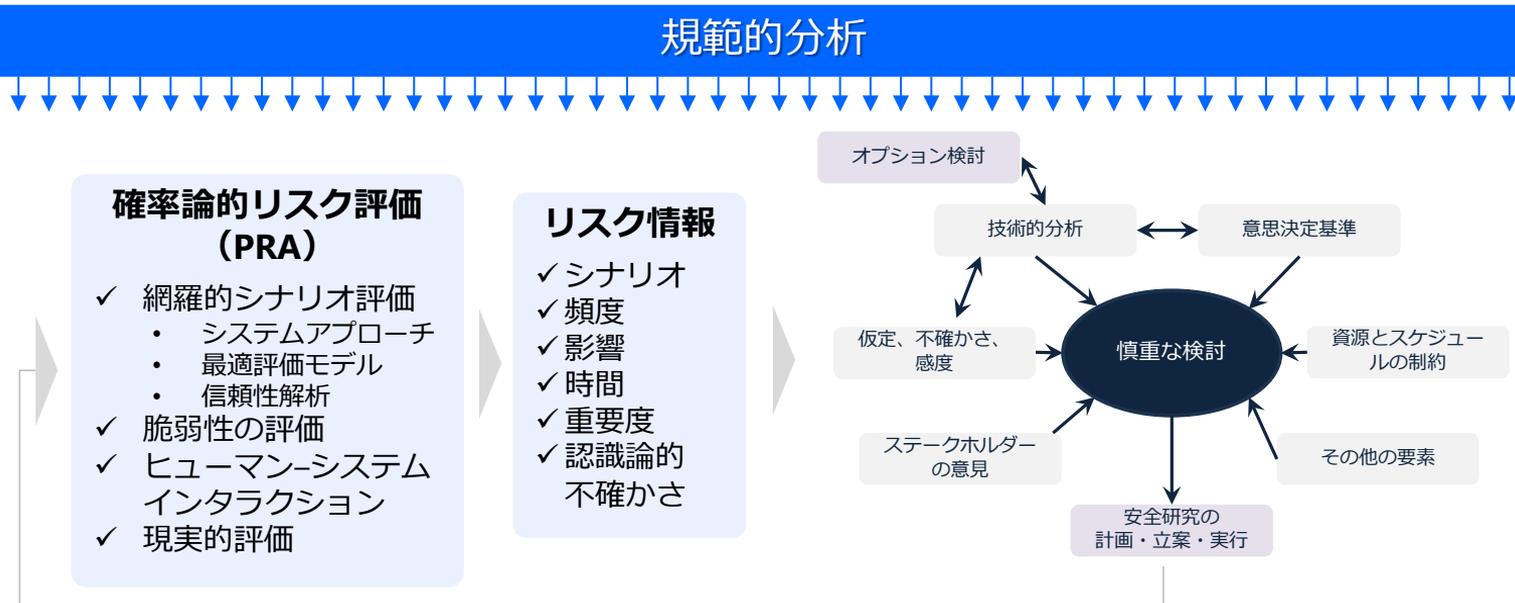
\*佐野巨他, これからの公共政策学 1 政策と規範, ミネルヴァ書房 (2021) .

†林岳彦, “規範的リスク分析”の確立に向けて「リスク評価に求められる価値のフレームとはなにか」, 日本リスク研究学会第32回年次大会 (2019) .

‡IAEA, SF-1 (2006). 日本原子力学会, 原子力安全の基本的な考え方について 第 I 編 原子力安全の目的と基本原則 (2013) .

# 今後の安全研究のあり方のまとめ

東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえ、リスク情報の活用と規範的リスク分析を通して、安全確保活動の深さ（≒リスクの抑制水準）と広さ（≒抑制するリスクの種類・範囲）の妥当性を継続的に検証していくことが重要。



リスク情報の活用と規範的リスク分析を通じた安全研究の継続的改善の概念