

## 【個別報告5】

# 次世代革新炉の安全性向上と 早期導入に資する研究

電力中央研究所  
エネルギートランスフォーメーション研究本部  
研究統括室 研究戦略担当（次期原子炉）  
兼 原子力リスク研究センター リスク評価研究チーム  
副研究参事 宇井 淳

研究報告会2023

2023年11月16日

Ⓜ 電力中央研究所

© CRIEPI 2023

Ⓜ 電力中央研究所

## 本報告でお伝えしたいこと

- 2050年のカーボンニュートラルを目指すには、サプライチェーン・技術・人材を維持し、次世代革新炉をタイムリーに導入していくことが重要。
- 本報告では、次世代革新炉の**新たな安全メカニズムの妥当性の確認に必要な知見を拡充**し、現象や解析手法などの**不確かさを低減**する研究、および**立地の自由度を拡大**する方策に関わる研究を紹介する。
- また、**原子力安全に関する国際標準的な考え方**や**今後の規制の近代化 (Modernization)の動向**を踏まえ、**次世代革新炉の安全設計・安全評価手法の構築**に取り組む方針を紹介する。

© CRIEPI 2023

1

## 報告内容

---

1. 次世代革新炉の計画と導入時期
2. 次世代革新炉の導入に資する研究開発
3. 今後の安全評価や規制の近代化に対応する研究
4. まとめ

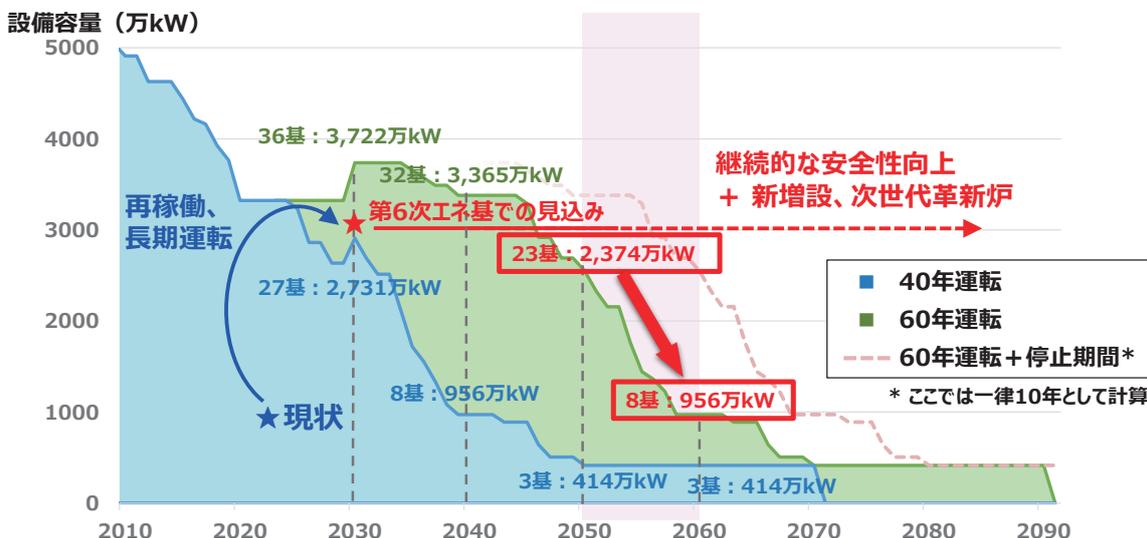
## 報告内容

---

1. 次世代革新炉の計画と導入時期
2. 次世代革新炉の導入に資する研究開発
3. 今後の安全評価や規制の近代化に対応する研究
4. まとめ

## 原子力発電所の設備容量の見通し

- 原子力発電所を60年運転としても2050年代に既設炉は急激に減少
- 電源確保のため、2050年までに次世代革新炉の導入が必要
- 設計、許認可、建設期間を踏まえ、着実に実現していく必要がある



© CRIEPI 2023 経済産業省 第31回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会「原子力政策に関する今後の検討事項について」(2022/9/24) を基に電中研で作成 4

## 次世代革新炉の今後の目標・戦略 (GX)

- 本発表では、2040～2050年代に運転開始の計画となっている以下の発電用の次世代革新炉<sup>1)</sup>を対象に説明。
  - 革新軽水炉
  - 小型軽水炉
  - 高速炉



出典：GX実現に向けた基本方針（閣議決定）参考資料（2023年2月10日）に枠を追記

## 当所の考える次世代革新炉の課題など

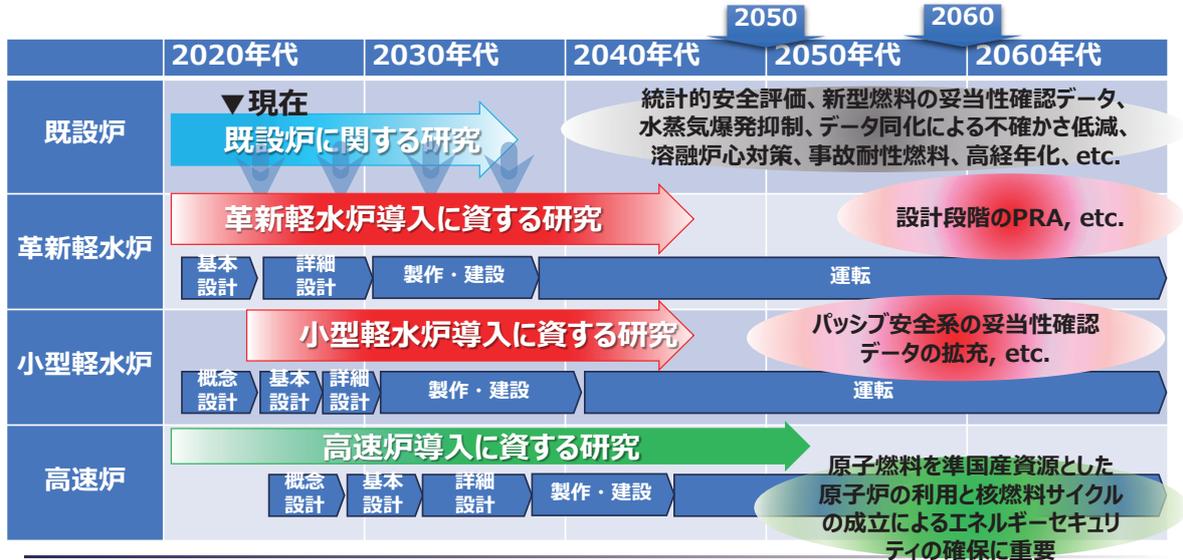
- 次世代革新炉の課題としては、発電事業としての成立性、サプライチェーン、技術・人材の維持、社会的受容性などが挙げられるが、以降では以下に関する研究について紹介。
- **新たな設計や安全メカニズム等の妥当性確認(Validation)の根拠となり不確かさを低減する知見の拡充**
- **立地自由度の拡大**
  - 『廃炉を決定した原子力発電の敷地内での次世代革新炉への建替え』
- **規制制度や要件の今後の変化を踏まえた安全評価等**
  - 小型炉や高速炉向けの規則の改定や制定
  - 今後の許認可の近代化や、原子力安全の考え方の深化による安全設計・安全評価手法の構築

## 報告内容

1. 次世代革新炉の計画と導入時期
2. 次世代革新炉の導入に資する研究開発
3. 今後の安全評価や規制の近代化に対応する研究
4. まとめ

## 次世代革新炉の導入に資する当所の研究

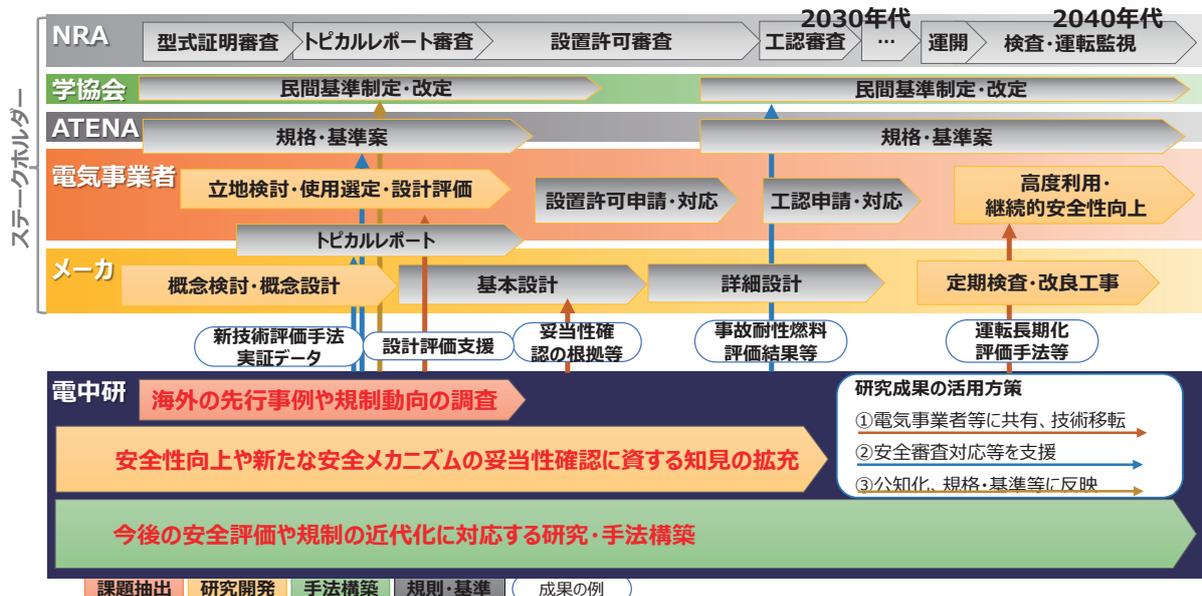
- 当所で取り組んできた既設炉の研究の多くは、革新軽水炉に利用可能
- 小型軽水炉向けの設計や安全に関わる研究も、今後進めていく予定
- 高速炉についても、金属燃料などの研究を進めている



© CRIEPI 2023 GX実現に向けた基本方針（閣議決定）（2023年2月10日）等を参考に作成

## 革新軽水炉に関する研究成果活用とその時期

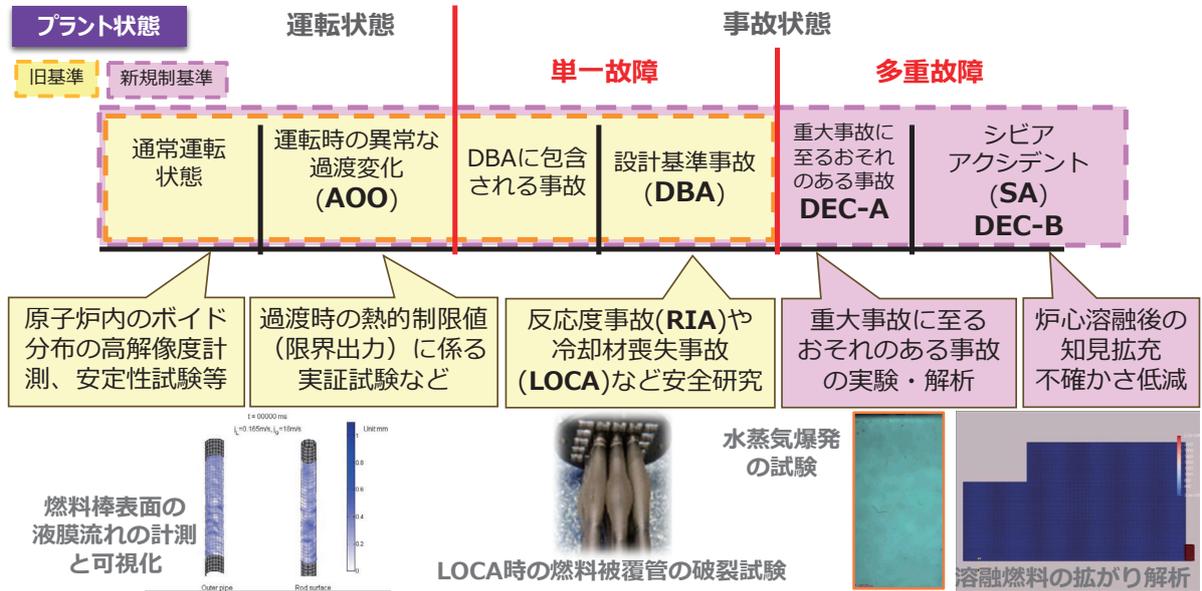
- 研究成果は、多くのステークホルダーに活用できるように取り組む
- 設計、建設、運転の各フェーズにタイムリーに反映できるようにする



© CRIEPI 2023

# 次世代革新炉の安全性確認に資する知見の拡充

- 各プラント状態（通常運転～シビアアクシデントまで）の重要な課題を抽出し、その解決や知見の拡充に必要な研究に取り組む



© CRIEPI 2023

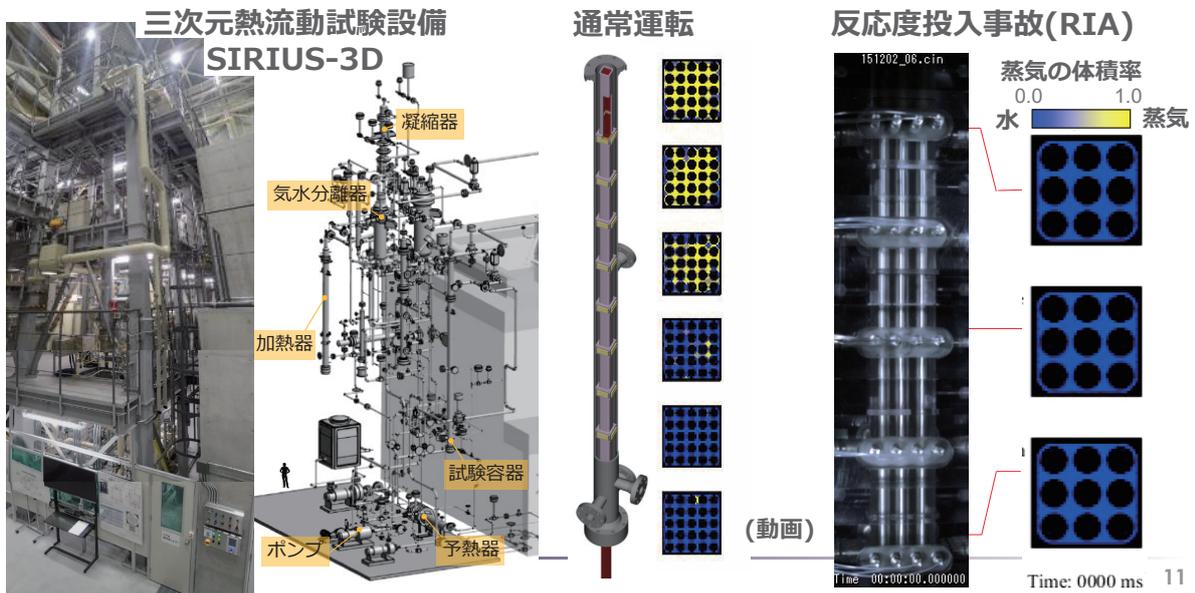
AOO: Anticipated Operational Occurrence, DBA: Design Basis Accident

RIA: Reactivity Insertion Accident, LOCA: Loss-of-coolant Accident, DEC: Design Extension Condition

10

# 通常運転～事故～シビアアクシデントにおける解析コード(計算プログラム)の妥当性確認データの取得

- 当所の高解像度の熱流動等の計測技術と、原子炉内を再現できる試験インフラを活用して、実際の原子炉と同じ高温・高圧の条件で試験を行い、次世代革新炉の妥当性確認に必要な知見を拡充する



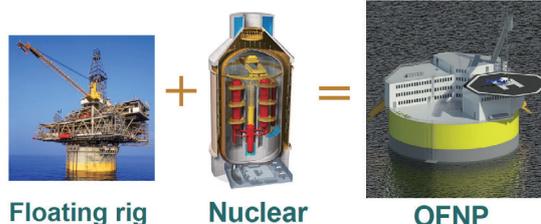
## 新たな原子力立地に関する研究

### ■ 次世代革新炉の新たな立地の自由度の拡大を目指して取り組む

#### ■ 洋上立地（浮体式原子力発電所）に関する研究<sup>2)~4)</sup>

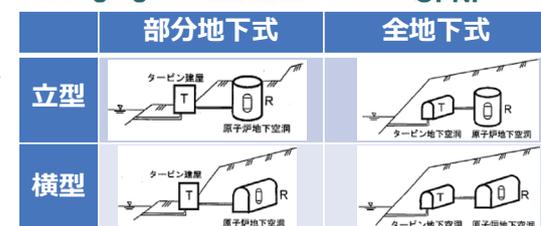
- 沖合30 kmでの稼働 → UPZ<sup>1)</sup>がすべて洋上 → 住民の避難がほぼ不要
- 外部自然ハザードの影響が緩和される（地震、津波、火山）
- 周辺に海水が豊富 → 炉心溶融事故を実質的に排除する設計が可能
- 経済産業省NEXIP事業<sup>2)</sup>にて実施中

- ✓ 浮体揺動を模擬した熱水力試験
- ✓ 革新軽水炉を搭載するレイアウト
- ✓ 沖合での揺動時の事故のシミュレーション
- ✓ 概念設計等



#### ■ 地下立地に関する研究

- 敷地内建替の制約の解決策の一つ
- 地下立地は地上と比較して土木・建築の面から耐震設計上有利と評価
- 1990年代に技術的・経済的成立性を確認したが、最新の基準・知見に照らして再評価を実施



© CRIEPI 2023 <sup>1)</sup>UPZ：緊急時防護措置を準備する区域 <sup>2)</sup>NEXIP：経済産業省「社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業」<sup>12)</sup>

## 報告内容

1. 次世代革新炉の計画と導入時期
2. 次世代革新炉の導入に資する研究開発
3. 今後の安全評価や規制の近代化に対応する研究
4. まとめ

## 当所が着目する次世代革新炉の設計や安全の観点

### ■ 欧米の安全基準や規制規則の近代化 (Modernization)

- IAEAやWENRA : 5)~9)
  - ✓ “放射性物質の大規模放出となる事故の実質的な排除”を要求
- 米国NRCやNEI : 11)~15)
  - ✓ 「原子力エネルギー革新と近代化法」(NEIMA)の制定
  - ✓ 米国産業界(NEI)による規制近代化への取組み (NEI18-04, NEI21-07)
  - ✓ NRCの非軽水炉や革新炉向けの新たな規制制度案 (10CFR Part 53の案)
- いずれも、**環境への放射性物質放出のリスク低減を重視**
  - ✓ 原子力の安全原則「**人と環境を放射線影響から護る**」の基本に回帰
  - ✓ 「**低頻度・高影響**」のシナリオも考慮する方向となっている

### ■ “How safe is safe enough?”の考え方の深化と対応

- 法令や規則への適合だけでなく、安全性を高めていくには：  
**深層防護、リスク情報、安全裕度、不確かさ**等を踏まえ、新設炉の設計や安全対策をどのように考え、解析・評価・判断するか

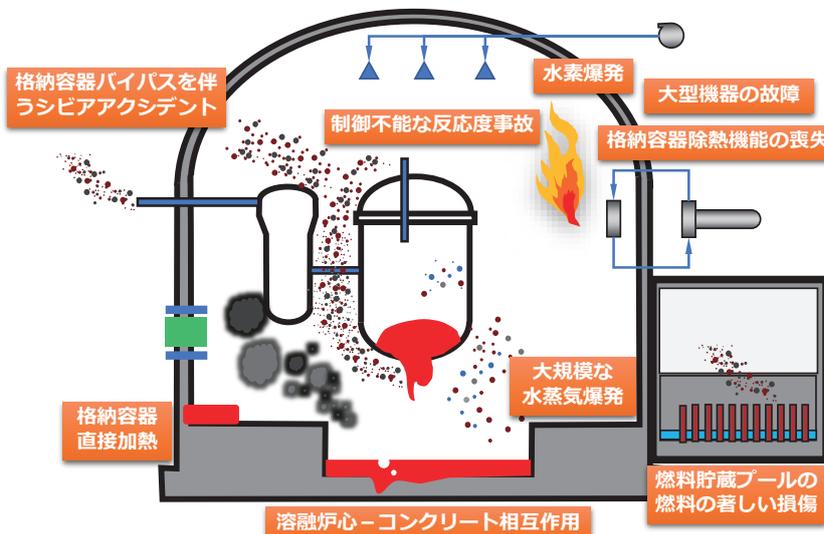
## 昨今の原子力安全の考え方・安全基準など(1)

### ■ IAEAやWENRA

- “**Practical Elimination (PE)**”がIAEA SSR-2/1(設計要件)に記載
  - ✓ 『**放射性物質の大規模放出となる事故の実質的な排除(Practical Elimination)**』を目指す設計を求めている
  - ✓ PEと言えるかの正当性は、**単に確率論的な目標を満たすかどうかで判断はしない**
  - ✓ **不確かさと解析の限界**を考慮し**決定論と確率論を組み合わせた安全評価が重要**
  - ✓ 設計や設備の安全性のターゲットとして、**安全目標**と類似の役割
- PEの概念
  - ✓ **第一の概念：物理的不可能性 (physical impossibility)**
    - 不確かさを踏まえて最大範囲や最悪ケースをカバーできることを示す必要がある → 実証が難しい
  - ✓ **第二の概念：高い信頼性を持ってその状態が著しく発生しにくいこと (extreme unlikelihood with a high degree of confidence)**
    - 基本は設計・設備対応。人的要因も可能な限り留意する。不確かさを考慮する(現象の不確かさも含む)。
    - 実証には、**決定論的な要件への適合の確認**と共に、**確率論的な分析**により **extreme unlikelihood**を確認する。(PRAは内的、外的、燃料貯蔵プールを含む)

## Practical Eliminationとして取り組むべき項目

- PEとして対処すべきカテゴリーに含まれる現象や事故シナリオの実質的な排除（リスクの低減）に繋がるように、必要な知見や実験的根拠を拡充する研究を進める



これらを実質的に排除する設計を目指すことが、IAEAやWENRAのnew reactor designの標準的な考え方

放射性物質の放出に関係し、設計基準を超えた重大事故やレベル2 PRAに関する項目が多い

## 昨今の原子力安全の考え方・安全基準など(2)

### ■ 米国NRCとNEI

- 既設炉の連邦規則 (10 CFR Part 50)
  - ✓ 段階規制で規範的(prescriptive)であり、申請者から不満が多かった
- 新型炉の連邦規則 (10 CFR Part 52)
  - ✓ 早期サイト許可(ESP)、設計認証(DC)、建設運転一括許可(COL)等の仕組みを用意したが、Part 52で建設が完了したのはまだ2基のみ
  - ✓ DOEの革新炉実証計画\*では、柔軟に設計変更できるPart 50を利用
- NEIやSouthern Companyは、許認可近代化プログラム(LMP)を推進し、リスク情報と性能を基準とするガイドを策定(NEI 18-04)
  - 設計段階のPRAによって複数基が立地するサイトの状態を考慮して種々の事象のシナリオがリスク上重要かどうかを確認する
  - 低頻度・高影響の事故シナリオのリスクを下げ、深層防護の充足性(adequacy)の評価を行っていく
- NRCは、非軽水炉と革新炉向けに新たな連邦規則案(Part 53)を策定。NEIと議論が継続中。
  - ✓ 非軽水炉に限らず革新軽水炉にも今後適用される見込み

## リスク重要度の許可基準事象を決める 頻度-影響ターゲット (F-C Target)

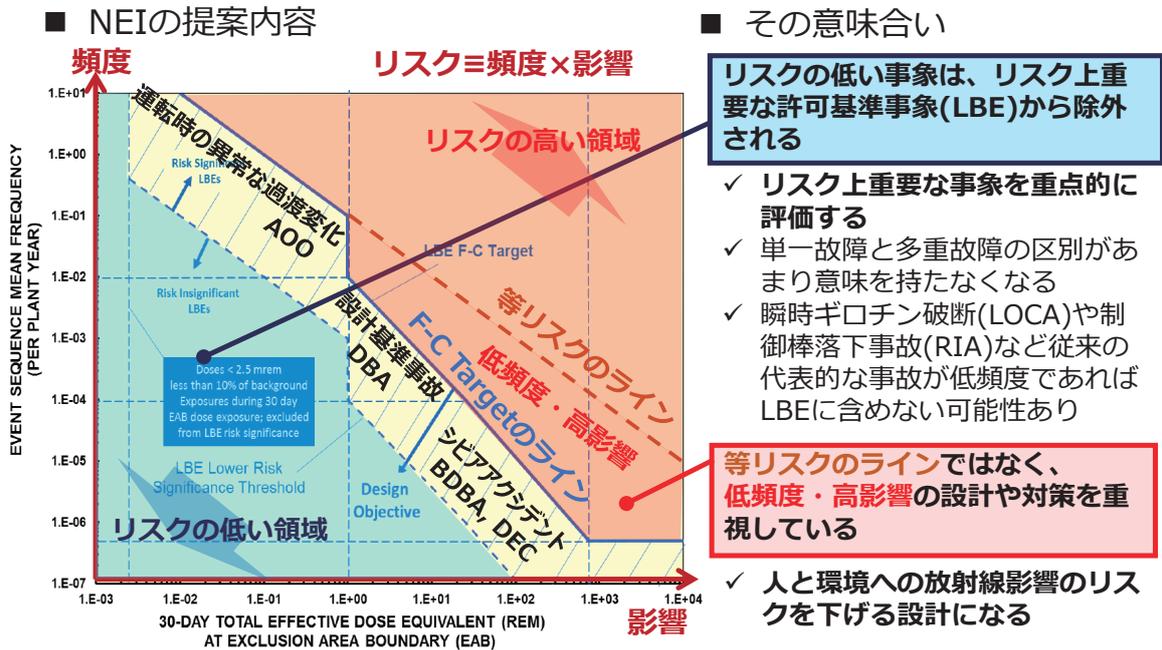
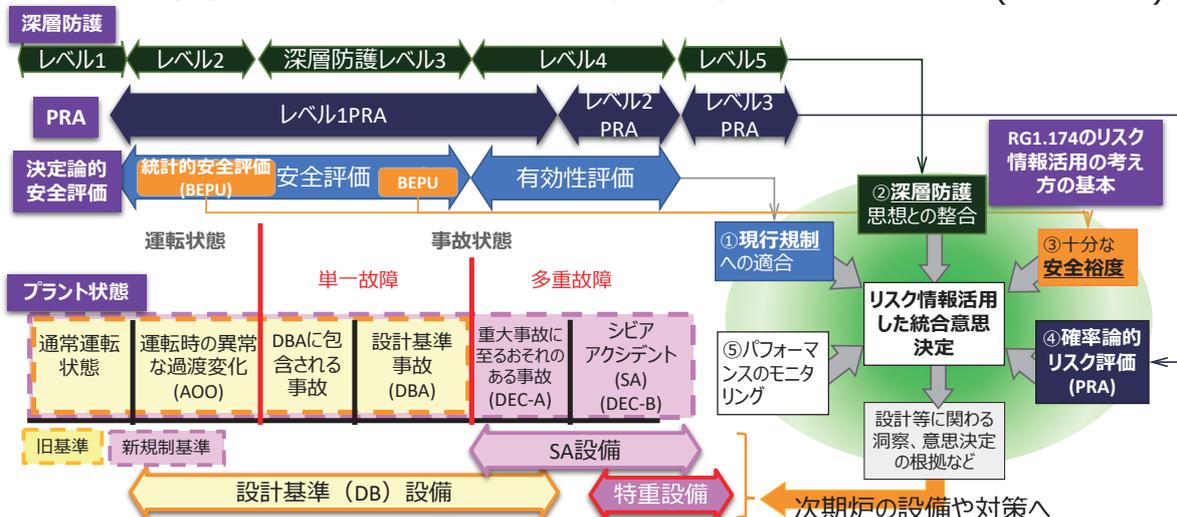


Figure 3-4. Use of the F-C Target to Define Risk-Significant LBEs 出典：NEI 18-04 (2019)のFig.3-4にFig.3-1の内容を筆者が一部加筆

## 次世代革新炉の設計や評価は深層防護の各層のバランス とリスク情報活用の5つの視点が重要

- 次世代革新炉の設備等は、**規制への適合**、**深層防護**、**PRA**、**安全裕度**、**モニタリング**など**リスク情報活用**の5つの視点で考えることが重要
- また、**深層防護の層間のバランス**が合理的にとれており、**代替策に過剰に依存せず**、**設計で対応**できる能力を有することが重要 (RG1.174)



© CRIEPI 2023 IAEAのPlant States (Glossary, SSR-2/1 rev.1), 深層防護の分類, Regulatory Guide 1.174の図等を併記して筆者が作成

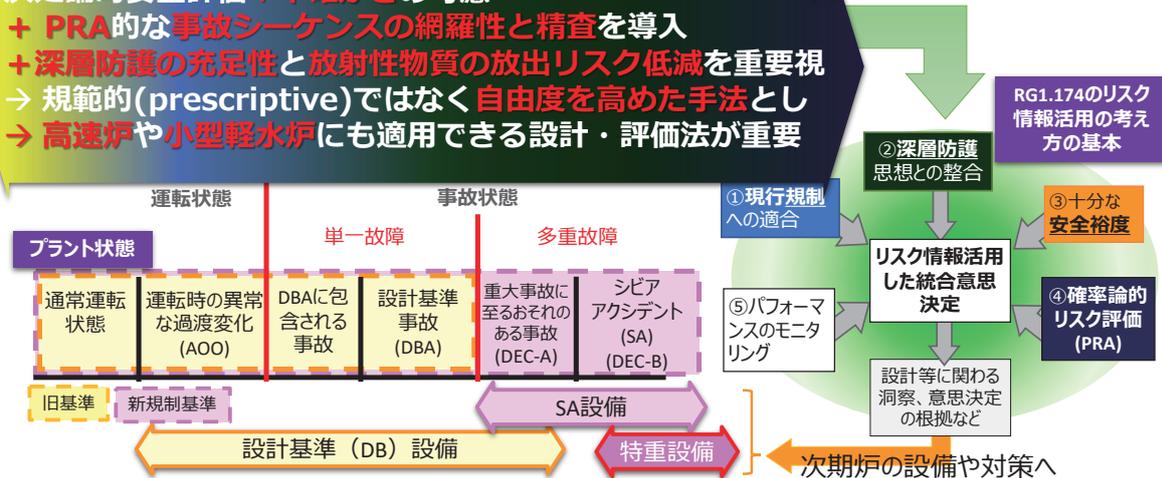
## 将来の規制の近代化に対応する安全設計・評価

- 前述のような規制の近代化の動向にも対応できる準備を進める
  - 建設前の設計段階のプラントを対象としたPRA手法を構築する
  - 決定論的安全評価に不確かさの考慮とPRAの長所を巧く取り込む

決定論的安全評価 + 不確かさの考慮

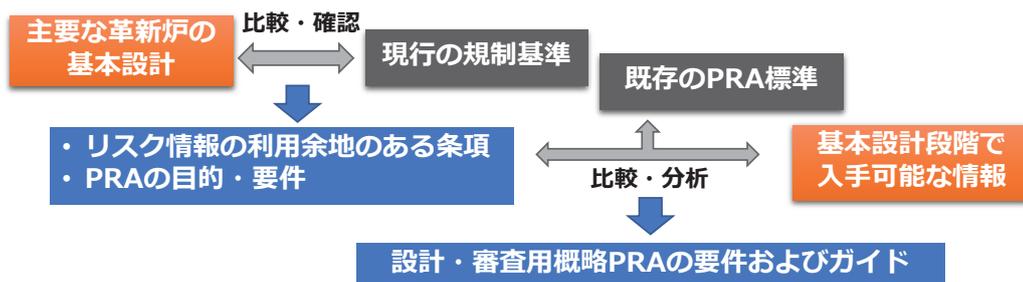
- + PRA的な事故シーケンスの網羅性と精査を導入
- + 深層防護の充足性と放射性物質の放出リスク低減を重要視
- 規範的(prescriptive)ではなく自由度を高めた手法とし
- 高速炉や小型軽水炉にも適用できる設計・評価法が重要

これらをうまく連携させる



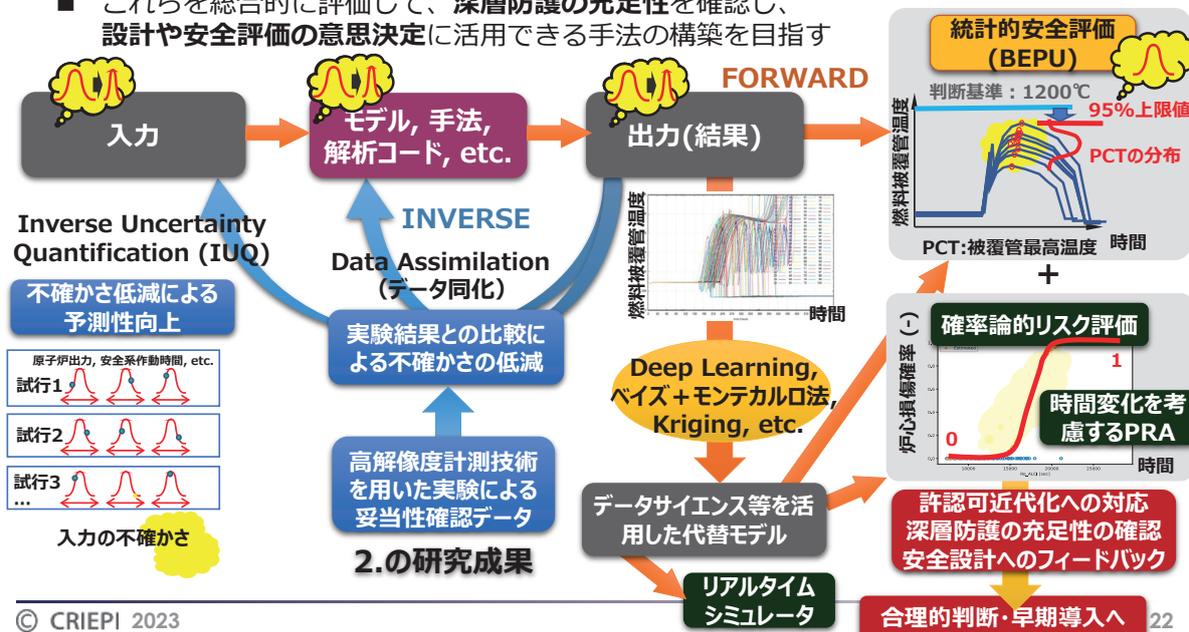
## 設計段階のPRAガイドの整備および 種々のハザードを扱う一括評価手法の構築

- 次世代革新炉の新たな安全メカニズムの規則等への適合性確認や、規則の解釈で言及されていない新たな方策の導入において、既設炉に比べ次世代革新炉の安全性が向上することを定量的に示せることは重要
- 設計段階の次世代革新炉について、既設炉よりリスク低下(安全性向上)を確認するPRAの方法論を構築する
  - 恒設/可搬式設備、建屋強化、熔融炉心対策等の効果の定量化, etc.<sup>16)</sup>
  - 種々の外的ハザードを踏まえたリスク評価
  - PRA等の不確かさを踏まえた深層防護の充足性の確認



## 決定論的安全評価をベースに確率論的アプローチや不確かさを踏まえた手法の構築・高度化

- 統計的安全評価と時間変化を考慮するPRAのプロセスは共通点が多い(FORWARD)
- 実測データとの比較や入力の変正化による**不確かさ低減**手法を実用化する(INVERSE)
- これらを総合的に評価して、**深層防護の充足性**を確認し、**設計や安全評価の意思決定**に活用できる手法の構築を目指す



© CRIEPI 2023

## 報告内容

1. 次世代革新炉の計画と導入時期
2. 次世代革新炉の導入に資する研究開発
3. 今後の安全評価や規制の近代化に対応する研究
4. まとめ

© CRIEPI 2023

23

## まとめ

- 2050年のカーボンニュートラルを目指すには、目標とする原子力発電の電源構成比率の達成やサプライチェーン・技術・人材の維持のため、次世代革新炉の導入をタイムリーに進めることが重要。
- 当所の次世代革新炉の研究は、原子力安全の基本的な考え方、リスク、**大規模な放射性物質を放出する事故の実質的な排除**等の観点で、**新たな安全メカニズムの妥当性確認に必要な知見や実験的根拠を拡充し、不確かさを低減する研究**を進めていく。また、次世代革新炉の**立地の自由度を拡大**する方策の研究も、引き続き取り組む。
- 次世代革新炉の**安全性向上を設計段階で合理的に確認できるPRA**の活用方法・ガイドの構築や、**将来の規制の近代化に対応する安全設計・安全評価**に関わる研究を進め、早期導入を支援する。

ご清聴ありがとうございました

R 電力中央研究所

Central Research Institute of Electric Power Industry

## 参考文献

- 1) 内閣官房: GX実現に向けた基本方針(閣議決定)(2023年2月).
- 2) J. Buongiorno, M. Golay, N. Todreas: Offshore Floating Nuclear Power Plant, IAEA Marine based SMRs (2021).
- 3) 産業競争力懇談会: 2022年度プロジェクト最終報告 浮体式原子力発電(2023年2月).
- 4) 宇井 淳: 国内における浮体式原子力発電の検討状況, 日本原子力学会誌, 65(9), 547-551 (2023).
- 5) IAEA: Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety Requirements No. SSR-2/1, Revision 1 (2016).
- 6) IAEA: Considerations on the Application of the IAEA Safety Requirements for the Design of Nuclear Power Plants, IAEA-TEDOC-1791 (2016).
- 7) IAEA: Assessment of the Safety Approach for Design Extension Conditions and Application of the Concept of Practical Elimination in the Design of Nuclear Power Plants, Draft Version of SSG-88 (2023).
- 8) WENRA: WENRA Report Safety of new NPP designs (2013).
- 9) WENRA: WENRA Report Practical Elimination to New NPP Design (2019).
- 10) IAEA: Nuclear Safety and Security Glossary (2022).
- 11) NRC: Regulatory Guide 1.174, An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-specific Changes to the Licensing Basis, Revision 3 (2018).
- 12) NEI: Risk-Informed Performance-Based Technology Inclusive Guidance for Non-Light Water Reactor Licensing Basis Development, NEI 18-04, Rev.1 (2019).
- 13) NRC: Regulatory Guide 1.233, Guidance for a Technology-Inclusive, Risk-Informed, and Performance-Based Methodology to Inform the Licensing Basis and Content of Applications for Licenses, Certifications, and Approvals for Non-Light-Water Reactors (2020).
- 14) NRC: Proposed Rule, SECY-23-0021, NRC Regulations Title 10, Code of Federal Regulations, Part 53 – Risk Informed, Technology-Inclusive Regulatory Framework for Advanced Reactors (2023).
- 15) NEI: Technology Inclusive guidance for Non-Light Water Reactors, NEI 21-07 (2021).
- 16) 日本原子力学会 原子力発電部会: 「次期軽水炉の技術要件検討」ワーキンググループ報告書(2020).

## 略語一覧

- AOO: Anticipated Operational Occurrence: 運転時の異常な過渡変化
- ARDP: Advance Reactor Demonstration Projects: DOEの革新炉実証プロジェクト
- BDBA: Beyond Design Basis Accident: 設計基準を超える事故
- BEPU: Best-Estimate Plus Uncertainty: 統計的安全評価
- 10 CFR: NRC Regulations Title 10, Code of Federal Regulations
- COL: Combined License: 建設運転一括許可
- DBA: Design Basis Accident: 設計基準事故
- DEC: Design Extension Condition: 設計拡張状態
- DC: Design Certification: 設計認証
- DOE: Department of Energy: 米国エネルギー省
- ESP: Early Site Permission: 早期サイト許可
- GX: Green Transformation: グリーントランスフォーメーション
- IAEA: International Atomic Energy Agency: 国際原子力機関
- L(E)RF: Large (Early) Release Frequency: (早期)大規模放出
- LMP: Licensing Modernization Program: 許認可近代化プログラム
- LOCA: Loss-of-coolant Accident: 原子炉冷却材喪失事故
- NEI: Nuclear Energy Institute
- NEIMA: Nuclear Energy Innovation and Modernization Act: 原子力エネルギー革新と近代化法
- NEXIP: Nuclear Energy x Innovation Program
- NRC: Nuclear Regulatory Commission: 米国原子力規制委員会
- PE: Practical Elimination, Practical Eliminated: (放射性物質の大規模放出となる事故の) 実質的な排除
- RIA: Reactivity Insertion Accident: 反応度投入事故
- PRA: Probabilistic Risk Assessment: 確率論的リスク評価
- UPZ: Urgent Protective Action Zone 緊急時防護措置を準備する区域
- WENRA: Western European Nuclear Regulators' Association